

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT AUTOMATYKI I POMIARÓW

LHO

PIAP

A

Al. Jerozolimskie 202

02-486 Warszawa

Ośrodek Mechatroniki OME

Główny wykonawca: mgr inż. Zbigniew Pilat

Wykonawcy: mgr inż. Krzysztof Antczak

Nr zlecenia: S1805


Tytuł pracy: Kalibracja robotów i instalacji zrobotyzowanych

Zleceniodawca: praca statutowa PIAP

Pracę rozpoczęto dnia: 1997.10.15

zakończono dnia: 1997.12.20

Kierownik Ośrodka

mgr inż.  Zbigniew Pilat

Dyrektor Pionu

dr inż.  Jan Jablkowski

Praca zawiera:
egz.:

Rozdzielnik - ilość

stron -- 15
rysunków --
fotografii --
tabel --
tablic --
załączników --

Egz. 1 OME
Egz. 2 OME
Egz. 3 OIN
Egz. 4
Egz. 5
Egz. 6

Nr arch. 7511

Analiza deskryptorowa :

KALIBRACJA, ROBOT, SYSTEMY POMIAROWE, SYSTEMY KALIBRACJI,
DOKŁADNOŚĆ, POZYCJONOWANIE.

Analiza dokumentacyjna :

Sprawozdanie przedstawia problem kalibracji robotów i stanowisk zrobotyzowanych. Opisuje pojęcie procesu kalibracji i stosowane metody. Próbuje przeanalizować możliwość wykorzystania systemów kalibracji do zastosowania ich w PIAP-ie.

Tytuły poprzednich sprawozdań :

Niniejsze sprawozdanie jest pierwszym i jedynym dokumentem przedstawiającym przebieg realizacji pracy w zleceniu S1805.

Spis treści

1. Cel pracy.....	4
2. Pojęcie kalibracji i rodzaje kalibracji.....	4
3. Znane systemy kalibracji	8
4. Badania w dziedzinie kalibracji prowadzone w placówkach naukowych	10
5. Przykłady systemów używanych do pomiarów położenia robota	12
6. Przegląd witryn WWW głównych producentów robotów	13
7. Możliwość użycia systemów kalibracji w PIAP-ie	13
8. Wnioski	14
9. Spis materiałów	14

1. Cel pracy

Celem pracy było przeanalizowanie problemu kalibracji robotów i stanowisk zrobotyzowanych. Sformułowanie pojęcia procesu kalibracji i opis stosowanych metod. Przegląd dostępnych materiałów, zarówno konferencyjnych jak i istniejących w Internecie. Próba przeanalizowania możliwości wykorzystania systemów kalibracji do zastosowania ich w PIAP-ie.

2. Pojęcie kalibracji i rodzaje kalibracji

W obecnych czasach rozwoju techniki robotyzacyjnej pojęcie kalibracji nabrało szerszego znaczenia. Dawniej odnoszono ten proces tylko do samego robota. Tak naprawdę jest to tylko mała część złożonego procesu kalibracyjnego. Współcześnie kalibracja składa się z wielu kroków, a kalibracja robota jest tylko jednym z nich. Obecnie wszystkie anomalie obiektów, wchodzących w skład operacji robotycznej (narzędzie, robot, część obrabiana, urządzenia peryferyjne) muszą zostać wyeliminowane. Jak wskazują badania, błędy narzędzia, części obrabianej, otoczenia są główną przyczyną problemów w czasie produkcji i przyczyną zastoju. Dlatego kalibracja powinna obejmować więcej niż tylko samego robota. Powinno używać się więc określenia „kalibracja gniazda robotycznego” lub „kalibracja zadania robotycznego”, wskazującego, że proces kalibracji obejmuje wszystkie elementy znajdujące się w gnieździe robota i ma na celu uzyskanie perfekcyjnego wykonania zadania przez robot. Ścisłej mówiąc, kalibracja gniazda robotycznego może być zdefiniowana jako zbiór akcji kalibracyjnych mających na celu eliminację lub kompensację wszystkich różnic między otoczeniem, w którym jest generowane zadanie robota a otoczeniem, w którym ma ono ostatecznie zostać wykonane.

W lutym 1996 powstał w Europie projekt IRIS (Improvement of Robot Industrial Standardisation), który ma na celu stworzenie i rozwijanie poprawnych kryteriów jeśli chodzi o wykonywanie robotów oraz stworzenie standardów w dziedzinie pomiarów robotów (zarówno do testowania jak i kalibracji). Poniższy podział rodzajów kalibracji bazuje właśnie na tym projekcie. Wyróżniamy więc następujące rodzaje kalibracji :

I. kalibracja robota - proces mający na celu poprawienie dokładności robota przez modyfikację oprogramowania odpowiedzialnego za jego pozycjonowanie, a nie przez zmianę lub przerobienie struktury robota lub jego systemu sterowania. Obejmuje bardziej dokładną identyfikację zależności pomiędzy odczytami enkoderów a aktualną pozycją końca robota w układzie kartezjańskim. Jej celem jest aby robot mógł osiągnąć wyliczone położenia (pozycję i orientację) podążając wzdłuż zadanej trajektorii. Wyróżniamy trzy typy kalibracji robota :

1. numeryczna - ma na celu identyfikację odchylenia od nominalnego zachowania bez wyznaczania źródeł błędów. Robot jest traktowany jako czarna skrzynka,

w której wejściem jest żądana pozycja (w przestrzeni kartezjańskiej), a wyjściem pozycja osiągnięta. Jeśli otrzymane współrzędne robota nie odpowiadają zadany, wtedy odchylenia są przechowywane w pewnego rodzaju tablicy (look-up table). Przez interpolację wartości zawartych w tej tablicy, błąd dla żądanej pozycji może zostać przewidziany i uwzględniony w stosownej chwili (np. podczas tworzenia zadania dla robota).

2. statyczna - identyfikacja źródeł błędów, powodujących niedokładności statycznego pozycjonowania. Najbardziej znane źródła błędów statycznych robota to : nierównoległość i nieprostokątność między osiami, podatność, luzy, sprzężenia mechaniczne, błędne długości członów. Rozróżniamy trzy rodzaje kalibracji statycznej :
 - kalibracja na poziomie przegubu (joint-level calibration) - ma na celu określenie ścisłej relacji między sygnałem enkodera a aktualnym przemieszczeniem przegubu. Dla robotów wyposażonych w enkodery względne, kalibracja ta jest wykonywana zawsze po włączeniu zasilania, w celu ustalenia pozycji odniesienia. Każdy przegub porusza się do momentu napotkania zerowego odczytu enkodera i odczyty enkodera są odnoszone względem tej pozycji. Dla robotów z enkoderami absolutnymi, wartości odczytane zawsze przedstawiają absolutną pozycję przegubu, także po włączeniu zasilania. Kalibracja ta jest wymagana, aby wykryć nieścisłości w odczytach enkoderów, tzn. *encoder offset* i *transmission error*.

Kiedy wszystkie przeguby są w położeniu odniesienia (zwanym położeniem „initgeo” lub zero mechaniczne, zdefiniowanym przez konstruktora; w PIAP-ie określane jako synchronizacja hardware’owa) koniec efektora musi być zawsze w tym samym położeniu. Jeśli odczyt enkodera różni się od wartości odniesienia w położeniu „initgeo”, to wtedy to odchylenie nazywamy *encoder offset*. Błąd ten może być wyeliminowany na drodze programowej lub poprzez poprawienie lokalizacji enkodera. Drugim aspektem kalibracji joint-level jest weryfikacja matematycznych zależności między odczytami enkodera a rzeczywistymi wartościami położzeń przegubów, realizowanymi przez system napędowy.

- kalibracja geometryczna - proste i odwrotne zadanie kinematyki, które kontroluje pozycjonowanie robota, bazuje na nominalnych wartościach członów i połączeń (kąty i odległości między kolejnymi osiami są parametrami nominalnego modelu geometrycznego). Jednak produkcja i montaż powodują, że rzeczywista geometria jest różna od modelu nominalnego. Odchylenia te powodują nieścisłości w pozycjonowaniu. Kalibracja geometryczna określa poprawiony model robota, w celu skompensowania wpływu błędów geometrycznych.
- kalibracja nie-geometryczna - system sterujący robota zawiera najczęściej tylko parametry do liniowego opisu napędu i geometrii. Inne źródła błędów i nieliniowości nie są implementowane, ponieważ opóźniałyby obliczenie w czasie rzeczywistym prostego i odwrotnego zadania kinematyki. Jednakże, a-

by osiągnąć większą dokładność ten wpływ powinien być zidentyfikowany i skompensowany. Kalibracja nie-geometryczna próbuje skompensować wpływ takich czynników jak luzy w przekładniach, podatność członów, wpływ temperatury, tarcie, histereza. Wymaga to uwzględnienia nowych parametrów w modelu robota (obok geometrycznych) i specjalnego wzbudzenia tych czynników w fazie pomiarów.

3. dynamiczna - identyfikacja źródeł błędów, powodujących efekty dynamiczne w czasie ruchu robota. Żeby przewidzieć i skompensować te efekty, są identyfikowane własności bezwładnościowe członów i serwowatorów, jak też wpływy zewnętrzne (zamocowanie robota, obciążenie, dodatkowe wyposażenie dołączone do ramienia). To pozwala uchwycić takie zachowania jak stabilność położenia, wibracje, przeregulowania, dokładność prędkości i przyspieszenia. Później identyfikuje się i buduje stosowny model dynamiczny, zdolny do przewidzenia pozycji, prędkości i przyspieszenia w odpowiedzi na zadaną trajektorię. Wartość prędkości i przyspieszenia, założona dla każdego przegubu, zależy od kształtu żądanej trajektorii i parametrów ruchu (żądaney prędkości wzdłuż trajektorii, maksymalnego błędu zaokrąglenia, maksymalnych zmian prędkości, przyspieszenia). Kalibracja dynamiczna próbuje przewidzieć, jak rzeczywisty robot będzie się poruszał w przestrzeni kartezjańskiej dla zadanej ścieżki ruchu lub zbioru parametrów ruchu. Jest to ważne przy tworzeniu off-line bezkolizyjnych trajektorii (wymaga się dobrej zależności między symulowanym a rzeczywistym ruchem robota).

Kalibracja robota jest używana najczęściej przy programowaniu off-line. Wtedy wymaga się, żeby pozycja osiągnięta przez robot zgadzała się z pozycją wygenerowaną przez program. Jeżeli robot jest programowany przez nauczanie ważniejsza od dokładności staje się powtarzalność i kalibracja nie musi być przeprowadzana.

- II. kalibracja narzędzia - nie tylko pozycja i orientacja narzędzia w przestrzeni są ważne. Kalibracja narzędzia jest stosowana w celu ścisłej lokalizacji tych części narzędzia (w odniesieniu do układu narzędzia), które oddziałują z obrabianymi przedmiotami. Do kalibracji narzędzia może być użyty albo zewnętrzny system pomiarowy albo sam robot.
- III. kalibracja otoczenia - ma na celu określenie względnej lokalizacji robota i wszystkich obiektów wewnątrz przestrzeni roboczej. Jest generowany model gniazda roboczego, zawierający opis położenia robota i obiektów w odniesieniu do wspólnego układu współrzędnych. Model może składać się ze zbioru zaprogramowanych w sterowniku robota pozycji (minimalna forma) lub być przedstawiony jako kompletny CAD-model ze szczegółową geometrią obiektów i opisem otoczenia gniazda roboczego. Kalibracja otoczenia aktualizuje ten model, tak żeby odzwierciedlał jak najbardziej precyzyjnie fizyczne otoczenie. Nie przeprowadza pomiarów geometrii obiektów, a jej zadaniem jest tylko określenie lokalizacji tych obiektów w odniesieniu do robota lub innego obiektu wewnątrz gniazda roboczego. Jako część kalibracji otoczenia trakto-

wana jest synchronizacja między różnymi aktywnymi elementami gniazda roboczego. Kalibracja otoczenia zakłada znajomość precyzyjnej geometrii wszystkich modelowanych obiektów.

IV. kalibracja przedmiotu obrabianego (workpiece calibration) :

1. kalibracja geometrii przedmiotu - Kalibracja ta odpowiada na pytanie, czy geometria przedmiotu odpowiada tej użytej w modelu off-line lub CAD-modelu. Traktuje część obrabianą tak jak narzędzie lub każde inne wyposażenie gniazda robotycznego.

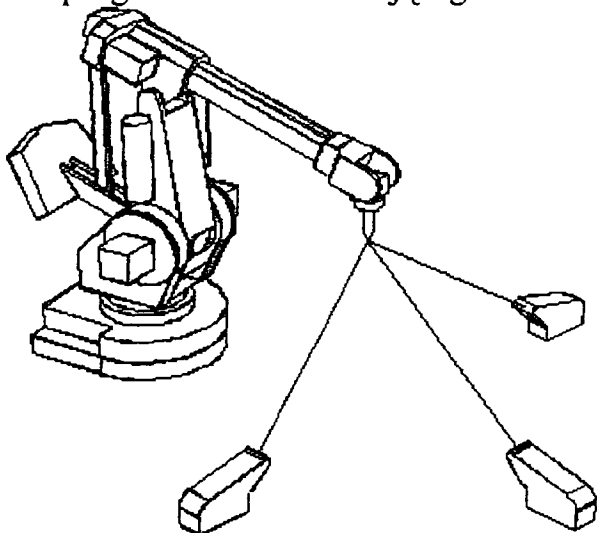
2. zadanych pozycji (command poses) - określenie zadanych pozycji na przedmiocie obrabianym. Jest stosowana w celu poznania precyzyjnej lokalizacji położeń i trajektorii odniesionych do przedmiotu obrabianego.

V. kalibracja procesu - skuteczne i zakończone sukcesem wykonanie zrobotyzowanej operacji wymaga nie tylko perfekcyjnego wykonania zadania przez robot, nieodzowne jest też poprawne ustawienie parametrów procesu. Kalibracja procesu zajmuje się badaniem zachowania całego wyposażenia danego procesu technologicznego. Ma na celu sprawdzenie czy proces symulacji odzwierciedla dokładnie rzeczywistość.

3. Znane systemy kalibracji

1. Robotrak - system kalibracji z Robotic Workspace Technologies, Inc., Floryda, USA. System jest zdolny do mierzenia pozycji statycznej lub ścieżek ruchu (motion paths) z dokładnością 0.2 mm w 3 wymiarach. Składa się z następujących elementów :

- 3 enkodery jako jednostki pomiarowej,
- połączenia z efekтором (effector),
- karty interfejsów między enkoderami a PC-tem,
- wzorcowej belki o znanej długości,
- oprogramowania działającego na PC.

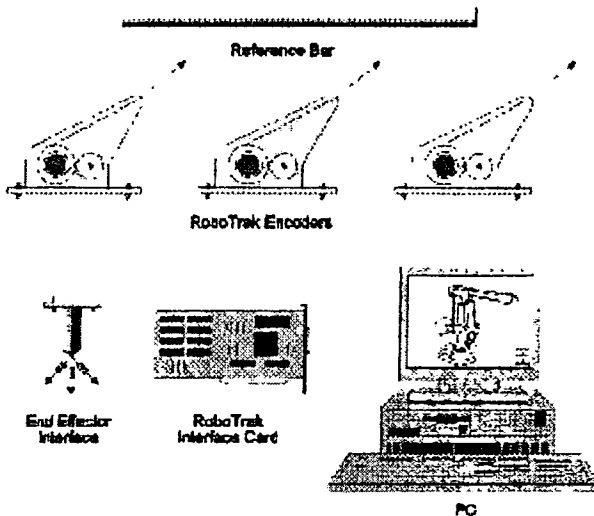


Rys.1 Robot połączony z enkoderami

Enkodery są ustawiane gdziekolwiek wewnątrz przestrzeni roboczej i z grubsza powinny znajdować się w rogach trójkąta równobocznego. Enkodery poprzez odpowiednie karty dołączone są do komputera, zawierającego oprogramowanie. Od każdego enkodera odchodzi nierozciągalna linka o stałym napięciu, skalibrowana z użyciem belki wzorcowej. Ilość zliczeń enkodera odpowiadająca długości linki jest założona dla każdej jednostki pomiarowej. Względna odległość między enkoderami jest zdeterminowana przez pocią-

gnięcie linek od każdej jednostki do sąsiadującej. Każda linka jest przeciągnięta od enkodera i dołączona do efektora, który jest dołączony do narzędzia lub ostatniego członu robota. Robot jest przemieszczany przez 50 punktów w swojej przestrzeni roboczej i w każdym punkcie są zapamiętywane pozycje robota odczytane przez enkodery (i oczywiście odpowiednio przeliczone). Punkty są ustalane wcześniej za pomocą panelu operatora. Po zapamiętaniu wszystkich punktów, program porównuje pozycje zmierzone (gdzie robot był) z pozycjami ustalonymi wcześniej i „wydobywa” błędy związane z kinematyką robota. Błędy te zawierają :

- pozycję zerową dla każdego połączenia,
- długość każdego członu,
- podatność każdego połączenia,
- offset narzędzia (odległość od punktu przyłączenia narzędzia na końcu ramienia do końca narzędzia), o ile narzędzie jest dołączone. Po obliczeniu błędów jest budowany filtr. Jest on używany do modyfikacji punktów zadanych przy pomocy panelu operatora, tak że reprezentują one aktualną pozycję w „rzeczywistym świecie” kontrolera.



Rys. 2 Elementy systemu Robotrak

2. **Workspace i Calibration Plus** - oba produkty są wytworem firmy Robot Simulations, Ltd., Ontario, Canada. **Workspace** jest oprogramowaniem (dokładnie systemem symulacyjnym funkcjonującym na PC-cie), zaś **Calibration Plus** to urządzenie pomiarowe (opis **Calibration Plus** jest zamieszczony w punkcie piątym sprawozdania). **WORKSPACE** umożliwia uzyskanie wiadomości o takich samych błędach jak przy użyciu systemu **Robotrak**. **WORKSPACE** wydobywa błędy z fizycznych pomiarów i punktów uzyskanych w czasie nauki przez próbę znalezienia modelu, który najlepiej pasuje do zmierzonej charakterystyki. Wszystkie punkty generowane w programie podczas symulacji przechodzą przez filtr, który przekształca je w taki sposób, że nieskalibrowany robot będzie oszukiwany w czasie ruchu do punktu, do którego chcemy rzeczywiście go przemieścić, przez przemieszczenie do niewiele różniącego się punktu. Jest to konieczne, ponieważ rzeczywisty robot może nie posiadać wiedzy o swoich fizycznych brakach. Przy pomocy tego pakietu można skalibrować robota z dokładnością do 1 mm.
3. **ROBCAD** - produkt firmy Tecnomatix. Jest kompleksowym narzędziem do projektowania, symulacji, optymalizacji i programowania off-line systemów produkcyjnych. Przy jego pomocy można poprawić jakość, skracać czasy cykli, zapobiegać błędom projektowania, interaktywnie projektować linie produkcyjne i gniazda robocze. Pozwala na wizualizację robotów, symulowanie gniazd produkcyjnych w celu przetestowania, zweryfikowania i optymalizowania ich miejsca ustawienia. Mimo że nie jest typowym systemem przeznaczonym do kalibrowania może być użyty również w tym celu.

4. Badania w dziedzinie kalibracji prowadzone w placówkach naukowych

1. Department of Mechanical and Materials Engineering at the University of Western Australia.

Prowadzone są badania nad kalibracją kinematyczną. Bazuje ona na założeniu, że mechanizm robota jest sztywny, tak że elastyczne odkształcenia nie są znaczne i że błędy mechaniczne (np. w przekładniach) mogą być zaniedbane (są to tzw. błędy niegeometryczne). Wyniki uzyskane z badań różnych robotów pokazują, że absolutny błąd pozycjonowania został zredukowany z ± 20 mm do mniej niż ± 1 mm. Zalety: technika pomiarowa jest prosta i używa ogólnie dostępnego wyposażenia, nie wymaga specjalnych rozważań nad redundancją parametrów kinematycznych. Wady: jeżeli jest wymagana ekstremalna dokładność trzeba uwzględnić błędy niegeometryczne.

2. Institute of Control Theory and Robotics, Slovak Academy of Science.

Użyto sensorów siły i momentów umiejscowionych w przegubach robota do określania błędów pozycjonowania. Pomysł oparty na założeniu, że elastyczność członów, podatność połączeń, luzy w przekładniach mogą być przedstawione w relacji siła-przemieszczenie końca ramienia. Jeżeli przy użyciu robota dokonujemy połączenia dwóch części, które nie są w idealnej pozycji względem siebie, to na styku tych części otrzymujemy inne wartości sił niż byśmy otrzymali, gdyby części były idealnie wypozyjonowane. Idealny rozkład sił zależy od charakterystyk całego systemu mechanicznego. Stworzona metoda uwzględnia również błędy pochodzące od interakcji między robotem a otoczeniem, np. między podstawą robota a podłogą. Umożliwia też redukcję błędów w procesach używających tzw. trajektorii technologicznych, np. spawanie.

3. Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Douai, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France.

Opracowano procedurę kalibracyjną do identyfikacji parametrów geometrycznych robota. Są identyfikowane tylko te parametry, które mogą być skorygowane przez sterownik robota. Model identyfikacyjny bazuje na różnych zmianach pozycji narzędzia jako funkcji różnych zmian parametrów geometrycznych. Rząd występujących błędów przyjęto jako pierwszy. Identyfikacja jest przeprowadzana przez minimalizację różnicy między rzeczywistym położeniem narzędzia a położeniem obliczonym przy użyciu modelu robota. Do definicji modelu robota użyto zmodyfikowanej notacji Denavita-Hartenberga, zaś do uzyskania rozwiązania stosowana jest metoda najmniejszych kwadratów. Pomiar położenia dokonywany jest przez optyczną triangulację przy użyciu dwóch teodolitów.

4. University of Brescia, Italy; Department of Mechanical and Materials Engineering at the University of Western Australia.

Oba ośrodki stworzyły procedury kalibracyjne, zakładając, że błędy związane z geometrią mają największy wpływ na dokładność robota. Pominęto wpływ

takich błędów jak podatność mechaniczna lub zmiany pod wpływem temperatury.

Pierwszy z ośrodków rozwinął metodę opartą na optycznym pomiarze ruchu chwytaka i rozwiązaniu równania, przedstawiającego zależność między parametrami strukturalnymi robota, takimi jak: długość członów, przesunięcia katowe połączeń (wyrażonymi we współrzędnych Denavita-Hartenberga) a zmierzonym położeniem chwytaka do oszacowania parametrów geometrycznych. Do pomiarów używano zarówno interferometrów laserowych jak i metod triangulacyjnych. Jeden z tych systemów pomiarowych działa na zasadzie, że wiązka laserowa odbija się od lustra zamocowane do chwytaka i pada na ekran tworząc świetlną plamkę. Ruch plamki jest mierzony przez kamerę dołączoną do PC-ta. Położenie plamki zależy od położenia i orientacji chwytaka.

Drugi ośrodek do oszacowania błędów geometrycznych zastosował rozszerzony filtr Kalmana. Filtr ten jest rekursywną metodą oszacowania stanu systemu. Metoda polegała na tym, że filtr Kalmana może być zastosowany do określenia nieznanymi parametrów geometrycznych robota, pod warunkiem, że relacja między błędami tych parametrów w strukturze i pomiarami współrzędnych chwytaka jest opisana zależnością liniową.

5. Dipartimento di Automatica e Informatica, Politecnico di Torino, Italy.

Przeprowadzono badania z wykorzystaniem kalibracji dynamicznej na robocie typu SCARA. Do stworzenia procedur kalibracyjnych wykorzystano dwa podejścia : pierwsze oparte na energetycznych równaniach Lagrange'a (zawierających tylko energię kinetyczną), drugie na rekursywnym sformułowaniu równań Newtona-Eulera, opisujących ruch robota. Parametry, które były określane przez obie procedury to : momenty bezwładności połączeń oraz współrzędne x, y środka masy drugiego członu.

5. Przykłady systemów używanych do pomiarów położenia robota

Systemy do pomiarów położenia robota dzielą się na dwie podstawowe kategorie. Pierwsza zawiera systemy optyczne, które używają bezkontaktowych metod śledzących. Druga oparta jest na wykorzystaniu różnego rodzaju systemów kablowych. Do pierwszej grupy należą przykładowo :

- SPACE - system opracowany przez Fraunhofer Institute w Berlinie. Położenie końca robota w przestrzeni 3D jest ustalane przez optyczną triangulację przy wykorzystaniu teodolitów. Dwa (lub więcej) napędzane silnikami teodolity z zmienną ogniskową są użyte do uzyskania informacji zgodnie z założonym kierunkiem poprzez software'ową obróbkę obrazów. Ta informacja powoduje ruch teodolitów, tak że mogą one śledzić ruchomy cel. Jako cel użyto samo oświetlającej się, 6-milimetrowej ceramicznej sfery. System był rozwijany i testowany we współpracy z Volkswagen, KUKA, Leica.
- SMART - system zbudowany przez tą samą grupę, która stworzyła SPACE. SMART używa jednościeżkowego interferometru laserowego do określenia położenia odbłyśnika w przestrzeni 3D poprzez pomiar współrzędnych biegunowych (dwa kąty i jedna odległość). Może mierzyć z dokładnością 0.025 mm.
- Optotrak - system zbudowany na Surrey University w Wielkiej Brytanii, w którym zastosowano 2 lasery. Odbijająca światło tarcza jest dołączony do końca robota i użyta do odbicia 2 wiązek laserowych. Jeśli tarcza nie jest trafiona w środek wiązkami, wtedy odbicia są przesunięte. Odbicia te są użyte do śledzenia celu. System jest zdolny do mierzenia pozycji robota poruszającego się z prędkością 5m/s z dokładnością lepszą niż 0.5 mm.

Przykładem systemu drugiej grupy jest Calibration Plus skonstruowany przez firmę Robot Simulations Ltd. Calibration Plus jest 3-przewodowym systemem pomiaru pozycji x,y,z końcówki robota z dokładnością do 0.2 mm. Przewody odchodzą od bębnow umiejscowionych w przestrzeni roboczej, z grubsza w rogach trójkąta równobocznego. Odległość między bębniami wynosi 2 m, ale może być zmieniona (w zależności od wielkości mierzonego robota). Kable łączą na końcówce robota lub narzędzia. Długości kabli w danym momencie w czasie ruchu robota są obliczane na podstawie ilości obrotów bębnow (każdy bęben posiada własny optyczny enkoder zliczający jego liczbę obrotów) i zapisywane w komputerze (poprzez odpowiednie karty systemu Calibration Plus), a następnie na podstawie tego obliczana jest pozycja x,y,z.

6. Przegląd witryn WWW głównych producentów robotów

W ramach projektu dokonano przeglądu witryn WWW głównych producentów robotów. Miało to na celu sprawdzenie faktu, czy światowi potentaci w dziedzinie produkcji robotów zajmują się również takim problemem jakim jest kalibracja. Przejrzano strony następujących firm : ABB Robotics (www.abb.se/robotics), Reis Robotics (www.reisrobotics.com), Yaskawa Electric Corporation (www.yaskawa.co.jp), Motoman Inc. (www.motoman.com), Kuka Roboter GmbH (www.kuka-roboter.de/english/kuka_roboter/index.htm), Nachi Robotics (www.industry.net/c/mn/00h0lac0), Stäubli Unimation Ltd. (www.webzero.co.uk/database/2180.htm), Kawasaki Robotics Inc. (www.ar2.com, www.brautomation.co.uk/kawasaki), Mitsubishi Electric (www.mitsubishi-electric.com), Fanuc Robotics (www.fanucrobotics.com), Cloos Schweißtechnik GmbH (<http://cloos.de>). Głównymi produktami, których opisy można było przeczytać, były oczywiście opisy robotów oraz rozwiązań różnych procesów technologicznych przy ich wykorzystaniu. Jeśli chodzi o software, to dominowały programy do symulacji stanowisk zrobotyzowanych, programowania off-line. Wynikiem poszukiwań był **tylko jeden** opis programu do kalibracji robota, zamieszczony na stronie firmy Motoman Inc.

Produkt ten nosi nazwę RobotCal i jest wykorzystywany do kalibracji ramienia robota (też firmy) oraz końca ramienia narzędzia. Może być też stosowany przy programowaniu off-line, do kompensacji błędów powstałych przy reperacjach, po zderzeniach ramienia, po wymianie jednostek napędowych.

7. Możliwość użycia systemów kalibracji w PIAP-ie

PIAP dysponuje systemem Robotest firmy Polytec GmbH, Niemcy. System ten jest używany do pomiaru powtarzalności robota (także kątowej) oraz dokładności odtwarzania trajektorii prostoliniowej (jako urządzenie pomiarowe używany jest interferometr laserowy). Niestety, w takiej postaci w jakiej ten system się znajduje nie może zostać użyty do kalibracji robota. Powodem tego jest to, że zespół pomiarowy nie ma układu odniesienia. Bez tego zaś nie można porównać zadanej pozycji w czasie uczenia robota z pozycją jaką rzeczywiście robot osiągnie. Rozwiązaniem jest odpowiednie przerobienie całego systemu, ale wymaga to niestety dużego nakładu finansowego. Oczywiście dysponując odpowiednim zapasem środków pieniężnych można by było pokusić się o zakup któregoś ze znanych systemów kalibracyjnych (ROBCAD, Robotrak) lub systemu pomiarowego, np. SMART. Wtedy prace związane z tym problemem robotyzacji mogłyby się mocniej rozwijać w PIAP-ie i stałyby się być może początkiem laboratorium, z którego usług korzystałby polski przemysł.

8. Wnioski

Problem kalibracji jest problemem ważnym i nabierającym coraz większego znaczenia w procesie robotyzacji. Jest to jednak proces złożony i wymaga dużego nakładu środków (zarówno technicznych jak i finansowych). Na wynik zadania robotycznego ma wpływ nie tylko dokładność robota ale także narzędzia, usytuowanie przedmiotu obrabianego, wpływ otoczenia i jeszcze inne czynniki (opisane w sprawozdaniu). Opracowywane są różnego rodzaju metody kalibracji, których celem jest nie tylko uzyskanie jak najlepszych rezultatów, ale także prostota i szybkość. Budowane są również coraz dokładniejsze systemy pomiarowe, których wadą jest jednak bardzo duża cena. Wszystko to (cały proces kalibracji) powstaje w celu uzyskania jak najlepszej dokładności wytwarzanych elementów, w których procesie technologicznym są wykorzystane roboty.

9. Spis materiałów

I - Materiały konferencyjne :

1. Basilio Bona, Marina Indri.: „*Experiments on the dynamic calibration of a planar manipulator*”, 27th Symposium on Industrial Robotics, 6-8.10.1996 Milan, str.117-122.
2. Christopher T. Irwin.: „Automatic robotic calibration system”, Robots 10 Conference, 20-24.04.1986, Chicago, str.7-45/7-57.
3. Filip Geuens, et.: „Standardisation of robotic cell calibration: the key to successful integration of OLP”, International Robots & Vision Conference, 12-15.05.1997, Detroit, str. 5-11/5-25.
4. Giovanni Legnani, James Trevelyan.: „Static calibration of industrial manipulators: a comparison between two methodologies”, 27th Symposium on Industrial Robotics, 6-8.10.1996 Milan, str.111-116.
5. Masaru Ishii, et.: „Kinematic calibration of a robot manipulator for integrated robot systems”, 20th International Symposium on Industrial Robots, 4-6.10.1989, Tokyo, str. 993-1000.
6. J. L. Caenen, J. C. Angue.: „Robot calibration”, 20th International Symposium on Industrial Robots, 4-6.10.1989, Tokyo, str. 979-985.
7. S. Havlik.: „Fast diagnostics and calibration of robotic workcells for performing precise contact operations”, 27th Symposium on Industrial Robotics, 6-8.10.1996 Milan, str. 123-128.

II - Materiały uzyskane z Internetu :

1. Opis systemu Robotrak uzyskany ze strony firmy Robotic Workspace Technologies, Inc., Florida, USA (www.rwt.com),

2. Opis systemu ROBCAD uzyskany ze strony firmy Tecnomatix (www.tecnomatix.com),
3. Opis programu RobotCal uzyskany ze strony firmy Motoman Inc. (www.motoman.com),
4. Opis systemu Calibration Plus/Workspace uzyskany ze strony firmy Robot Simulations Ltd., Ontario, Canada (www.rosl.com),
5. Artykuły uzyskane ze strony firmy Robot Simulations Ltd. :
 - „Offline programming and robot calibration - the car industry” (www.rosl.com/offline2.htm),
 - „Robot and fixture Calibration for offline programming” (www.rosl.com/calarti.htm),
 - „Robot calibration - question and answer” (www.rosl.com/calartic.htm).
6. Artykuł „Robot calibration” uzyskany ze strony Department of Mechanical and Materials Engineering at the University of Western Australia (www.mech.uwa.edu.au/jpt/calibration.html).