

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Praca Inżynierska.

**Eliminacja wpływu siły grawitacji na odczyty z
czujnika sił i momentów sił.**

Tomasz Zupka

Opiekun: mgr inż. Tomasz Winiarski

Warszawa, 2009

Spis treści

Spis treści	i
1 Wstęp	1
2 MRROC++	3
3 Użyty sprzęt i transformacje matematyczne	7
3.1 Opis mechaniczny czujnika	7
3.2 Opis podłączenia czujnika i przepływu sygnałów	9
3.3 Opis stanowiska eksperymentalnego	10
3.3.1 Struktura manipulatora i rozmieszczenie poszczególnych układów odniesienia	11
3.4 Użyte transformacje matematyczne	12
3.5 Rozważane modele wykorzystywane opisujące manipulator i czujnik siły	13
4 Model symulacyjny transformacji sił	17
4.1 Wprowadzenie	17
4.2 Podstawa teoretyczna	17
4.3 Implementacja	19
4.4 Test modelu	19
5 Procedura wyznaczania modelu środka ciężkości narzędzia	21
5.1 Algorytm	21
5.1.1 Procedura podstawowa	21
5.1.2 Procedura alternatywna	23
5.2 Implementacja	24
5.2.1 Procedura wyznaczania modelu środka ciężkości narzędzia	24
5.2.2 Procedura testująca	26
5.3 Model środka ciężkości nieobciążonego narzędzia	27
5.3.1 Model środka ciężkości - dla robota on_track	27
5.3.2 Model środka ciężkości - dla robota postument	27
5.3.3 Testy	28
5.4 Zmiana obciążenia narzędzia, a jakość wyznaczenia siły skorygowanej	29

5.4.1	Dodatkowe obciążenie nie uwzględnione w modelu środka ciężkości	30
5.4.2	Dodatkowe obciążenie uwzględnione w modelu środka ciężkości	31
6	Przyczyny błędnych wartości skorygowanej siły uogólnionej	35
6.1	Model kinematyki ${}^0_W T$	36
6.2	Położenie czujnika względem nadgarstka ${}^W_S T$	36
6.2.1	Wyjściowe parametry modelu	37
6.2.2	Przesunięcie w osi x	37
6.2.3	Przesunięcie w osi y	39
6.2.4	Przesunięcie w osi z	40
6.2.5	Równoczesne przesunięcia w osiach x, y, z	42
6.2.6	Obrót w osi x	43
6.2.7	Obrót w osi y	43
6.2.8	Obrót w osi z	44
6.3	Położenie środka ciężkości narzędzia względem nadgarstka ${}^W_G P$ i ciężar narzędzia .	47
6.4	Parametry kalibracyjne opisujące model czujnika	50
6.4.1	Pomiar siły dokonany wzdłuż osi z , tabele: 6.25 oraz 6.26.	51
6.4.2	Pomiar siły dokonany wzdłuż osi x , tabele: 6.27 oraz 6.28.	51
6.4.3	Pomiar siły dokonany wzdłuż osi x obróconej o 180° , tabele: 6.29 oraz 6.30. .	52
6.4.4	Pomiar siły dokonany wzdłuż osi y , tabele: 6.31 oraz 6.32.	52
6.4.5	Pomiar momentu siły	53
6.4.6	Korekta modelu	54
7	Podsumowanie	55
	Bibliografia	57
	Spis rysunków	59
	Spis tablic	60

Rozdział 1

Wstęp

Roboty usługowe pomagające nam w codziennym życiu wymagają możliwie precyzyjnego sterowania pozycyjno-siłowego. Te z kolei korzysta z pomiarów sił i momentów sił wykonywanych z reguły w nadgarstku manipulatora. Pomiarów te obarczone są błędami, o zróżnicowanych źródłach. W założeniu interesujące są siły wywierane przez końcówkę narzędzia na otoczenie podczas kontaktu z tym otoczeniem. Niestety typowy czujnik siły rejestruje wszystkie siły działające na tę końcówkę, w szczególności siłę grawitacji i siłę bezwładności. W tej pracy zajmiemy się opracowaniem procedury automatycznego wyznaczania parametrów modelu środka ciężkości narzędzia przytwierdzonego do czujnika sił. Procedura zrealizowana została dla przypadku statycznego. Oznacza to, że poszczególne pomiary służące do wyznaczenia modelu wykonywane były w chwilach gdy robot nie poruszał się. Model środka ciężkości wykorzystywany jest w opracowanym wcześniej algorytmie eliminującym wpływ sił grawitacji na odczyty sił dla zmiennej w czasie orientacji czujnika sił a więc i narzędzia przytwierdzonego do tego czujnika. W pracy nie rozważaliśmy negatywnego wpływu siły bezwładności na pomiary.

Proponowana procedura zrealizowana została w oparciu o programową strukturę ramową MRROC++, krótko opisaną w rozdziale 2. Procedura była testowana na zmodyfikowanych robotach IRp-6. W laboratorium Robotyki Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej mamy dostęp do dwóch takich manipulatorów nieznacznie różniących się od siebie, dzięki czemu można było przeprowadzić analizę porównawczą. Czujnik umieszczony w nadgarstku manipulatora oraz zasada jego działania, pokrótce opisane zostały w rozdziale 3. System sterowania składał się z komputerów PC z systemem operacyjnym czasu rzeczywistego QNX.

Przeprowadzone testy wyznaczonego modelu środka ciężkości narzędzia przytwierdzonego do czujnika, opis implementacji procedury oraz opracowanie procedury alternatywnej zebrane zostały w rozdziale 5. Okazało się, że w zależności od użycia teoretycznie równoważnych wariantów tej procedury uzyskane wyniki potrafią znacznie się od siebie różnić. Kolejne etapy prac poszły w kierunku wskazania jakie inne czynniki w tym statycznym przypadku wpływają na błędy pomiarów. Badano orientacyjne znaczenie zaburzeń parametrów modeli wykorzystywanych w systemie sterowania na odczyty sił. W tym celu wykonana została seria eksperymentów (rozdział 6). Dodatkowo w celu lepszej interpretacji wyników eksperymentów powstał symulacyjny model transformacji sił napisany w środowisku MatLab (rozdział 4).

Rozdział 2

MRROC++

Swoje przygotowania do realizacji badań nad działaniem czujnika siły rozpocząłem od zapoznania się z programową strukturą ramową MRROC++ (Multi Robot Research Oriented Controller). W niej docelowo odbywają się wszelkie działania związane z obsługą manipulatora [6], [5], [3], [7].

Jednym z głównych powodów dla których zdecydowano się, że tworzony system będzie zorganizowany jako programowa struktura ramowa było to, że szybko zauważono, że większość wytwarzanego do sterowania robotami oprogramowania jest pod pewnymi względami bardzo do siebie podobna. W związku z tym można wydzielić skończony zbiór modułów z których część ulega zmianie w zależności od wykonywanego zadania, a część jest ściśle zależna od sprzętu na jakim wykonywane ma być zadanie. W skład takiej struktury ramowej wchodzi:

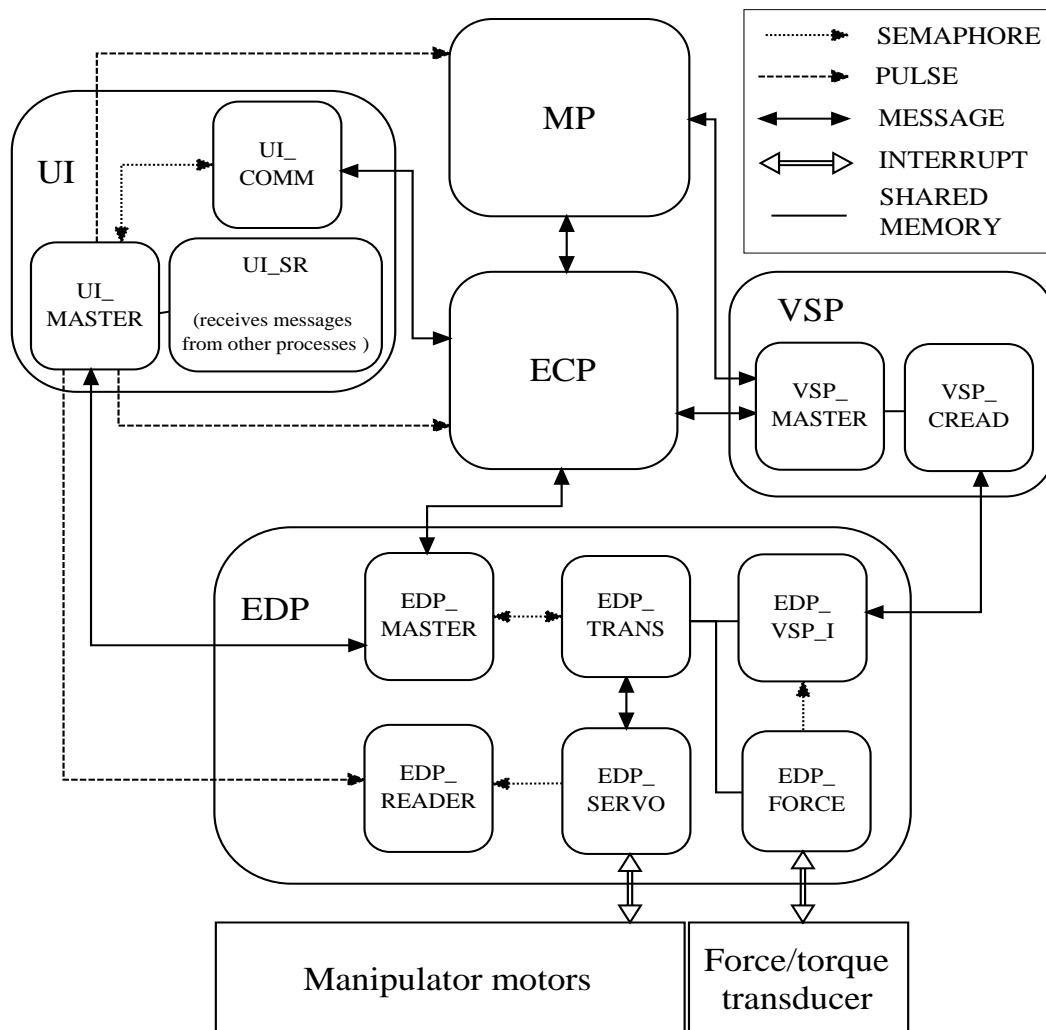
- biblioteki modułów, z których składany będzie program,
- wzorzec programu (rodzaj struktury szkieletowej), do którego wkładane będą moduły w zależności od potrzeb zadania do zrealizowania przez program oraz konfiguracji sprzętowej, na której ma on działać,
- narzędzia do tworzenia nowych modułów w przypadku gdyby istniejące nie były wystarczające do zrealizowania projektu.

System MRROC++ został stworzony właśnie na bazie takiej architektury. Jego zadaniem jest wspomaganie tworzenia sterowników dla systemów wielorobotowych. Językiem w jakim został on zaimplementowany jest C++. Tworzone w nim sterowniki odpowiadać mają konkretnie określonym zadaniom. Dlatego jeżeli chcemy zmienić zadanie musimy wymienić sterownik co wiąże się z pewnymi zmianami w kodzie źródłowym.

Powstające sterowniki są systemami czasu rzeczywistego tak więc by poprawnie działać pracują w całości pod nadzorem systemu operacyjnego czasu rzeczywistego QNX. System robotyczny można zdekomponować na trzy główne części:

- efekторы e - są to takie elementy systemu, które oddziałują na otoczenie, zmieniają jego stan (np.: przemieszczanie obiektów),
- receptory r - są to czujniki rzeczywiste (sprzętowe), zajmują się zbieraniem informacji o stanie otoczenia (np.: kamery, czujniki zbliżeniowe, dalmierze, czujniki sił i momentów sił),

Sterownik MRROC++ jest zorganizowany w hierarchiczną strukturę funkcjonalną. Poszczególne jego funkcje realizowane są przez moduły czyli odrębne procesy działające w węzłach sieci lokalnej. Rysunek 2.1 przedstawia podstawową strukturę systemu wraz z podziałem na poszczególne moduły oraz sposobami komunikacji między nimi.



Rysunek 2.1: struktura ramowa MRROC++

W najniższej z warstw, które wyróżniamy w układzie sterowania, tej która obejmuje procesy EDP, rezydują procesy odwołujące się bezpośrednio do urządzeń rzeczywistych (efektorów, receptorów). Są to sterowniki. W przypadku manipulatorów, procesy EDP zajmują się obliczaniem prostego i odwrotnego zadania kinematyki. Wątki EDP_SERVO to serwomechanizmy poszczególnych osi. Zadaniem procesów VSP jest odczyt i przetwarzaniem danych z czujników rzeczywistych. Zarówno procesy VSP

jak i EDP są ściśle zależne od sprzętu. Proces VSP jest dodatkowo zależny od zadania, natomiast EDP już nie. Aby dołączyć nowy efektor lub czujnik do systemu konieczna jest modyfikacja odpowiedniego, odpowiadającego mu procesu.

Procesy ECP znajdujące się w warstwie wyższej zajmują się sterowaniem poszczególnymi efektorami, natomiast zajmujący warstwę nadrzędną proces MP odpowiada za ich koordynację. W przeciwieństwie do procesów VSP i EDP procesy MP oraz ECP są niezależne od sprzętu. Oba są zależne od zadania. Jeżeli chcemy zdefiniować nowe zadanie to w szczególności musimy zmodyfikować te procesy oraz proces VSP także zależny od zadania.

Generatory trajektorii, których celem jest określenie w ścisły sposób realizacji zadania, występują zarówno na poziomie procesu MP jak i procesów ECP sterujących poszczególnymi efektorami. Istnieje jeszcze warstwa zajmująca się komunikacją użytkownika ze sterownikiem. Wyróżniamy w niej dwa wątki UI i SR. UI (User Interface) obsługuje zlecenia operatora systemu natomiast SR (System Response) odpowiada za odbieranie komunikatów od innych procesów. Do realizacji komunikacji pomiędzy poszczególnymi procesami w systemie MRROC++ używane są bufory komunikacyjne. Każdy z procesów posiada takie bufory. Przechowuje w nich takie informacje jak pakiety komunikacyjne czyli odpowiednie struktury danych odbierane z lub wysyłane do innych procesów.

Rozdział 3

Użyty sprzęt i transformacje matematyczne

3.1 Opis mechaniczny czujnika

Zawarte w tym rozdziale informacje na temat czujnika siły czerpałem z jego dokumentacji pobranej ze strony producenta, firmy ATI [1].

Pierwszym który sformułował zasady oddziaływania sił był Izaak Newton. Opisana przez niego trzecia zasada dynamiki mówi o wzajemności oddziaływań ciał. Jest często nazywana zasadą akcji i reakcji:

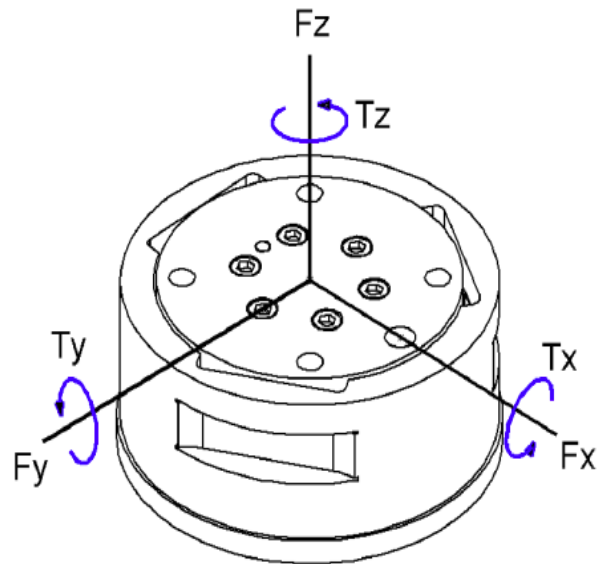
Jeżeli ciało A działa na ciało B siłą F_{AB} , to ciało B działa na ciało A siłą F_{BA} , o takim samym kierunku i wartości jak F_{AB} , ale przeciwnym zwrocie.

Moment siły (moment obrotowy) - \vec{M}_0 siły \vec{F} względem punktu O jest to iloczyn wektorowy promienia wodzącego r , o początku w punkcie O i końcu w punkcie przyłożenia siły oraz siły \vec{F} .

$$\vec{M}_0 = \vec{r} \times \vec{F}$$

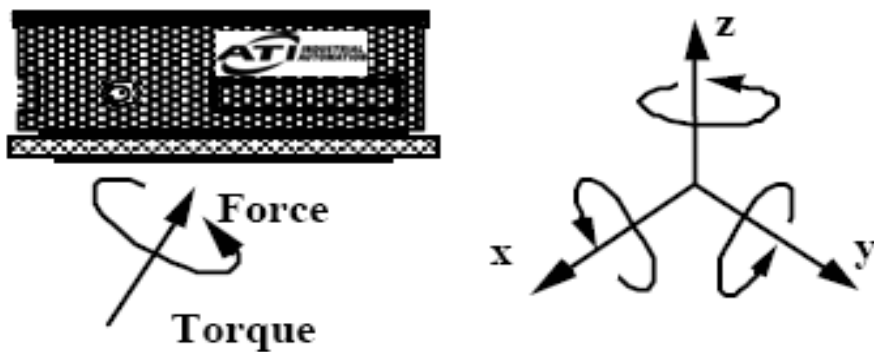
Określa się także moment siły względem osi, jest on równy rzutowi wektora momentu siły na tę prostą. Współrzędne M_x, M_y, M_z wektora \vec{M}_0 nazywają się momentami siły względem odpowiednich osi x, y i z .

Czujnik (przetwornik) reaguje na przyłożone siły i momenty sił zgodnie z trzecią zasadą dynamiki Newtona. Rysunki 3.1 oraz 3.2 pokazują kierunki sił - F oraz momentów sił - T w osiach x, y i z oraz przykładową siłę przyłożoną do czujnika.



Wektory sił i momentów przyłożonych do czujnika.

Rysunek 3.1: Wektory sił i momentów sił przyłożonych do czujnika



Rysunek 3.2: Przykład siły przyłożonej do czujnika

Siła przyłożona do przetwornika napręża trzy symetrycznie umieszczone belki (pręty wykonane z metalu) zgodnie z prawem Hooke'a:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.1)$$

gdzie:

σ - naprężenie belki (σ jest proporcjonalne do siły),

E - bezwzględna sprężystość belki,

ε - siła przyłożona do belki.

Przetwornik jest monolityczną strukturą zaprojektowaną w taki sposób by wytrzymać duże przeciążenia. Belki wykonane są z metalu. To zmniejsza histerezę i zwiększa siłę oraz odporność struktury

na odkształcenia. Do belek dołączone są półprzewodniki mierzące naprężenia w belkach. Nazywane są one tensometrami. Oporność tensometrów zmienia się wraz z przykładanym naprężeniem i ich długością. Wyraża to poniższy wzór:

$$\Delta R = S_a R_o \varepsilon \quad (3.2)$$

gdzie:

R - zmiana rezystancji miernika siły,

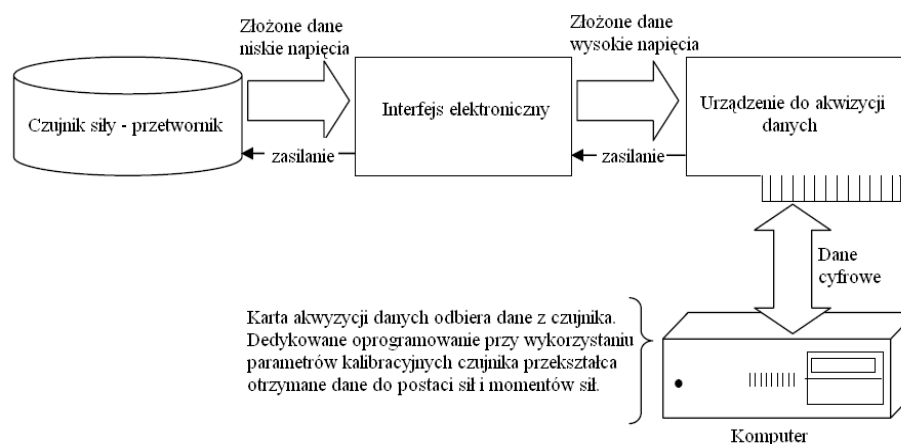
S_a - współczynnik naprężenia miernika siły,

R_o - rezystancja w stanie bez przyłożonej siły,

ε - siła przyłożona do miernika naprężenia.

Do czujnika siły dołączone jest przystosowane do tego urządzenie elektroniczne, które mierzy zmianę rezystancji, a potem odpowiednie oprogramowanie przekształca otrzymane na wejściu zmiany na odczyty sił i momentów sił.

3.2 Opis podłączenia czujnika i przepływu sygnałów

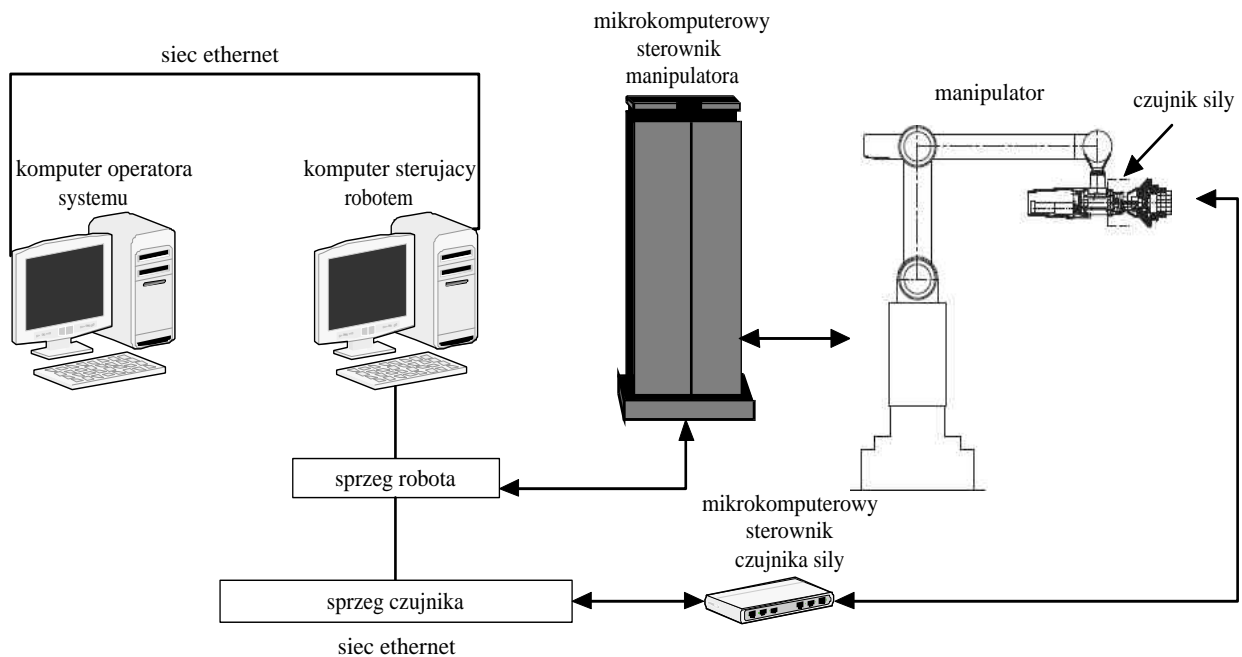


Rysunek 3.3: Schemat przepływu pomiarów z czujnika siły (elektoroniczne połączenie czujnika z komputerem).

Ogólny schemat przepływu pomiarów z czujnika siły przedstawiony został na rysunku 3.3. Roboty **postument** i **on_track** różnią się jednak kilkoma szczególnymi elementami jeżeli chodzi o instalację czujnika oraz sposób i miejsce akwizycji uzyskiwanych pomiarów.

- **on_track** - Robot ten jest podłączony przez specjalny kontroler F/T do karty PCI mieszczącej się w komputerze. Częścią przetwarzania zajmuje się w tym przypadku wspomniany kontroler

F/T akwizycji danych firmy Schunk (mikrokomputerowy sterownik czujnika siły FT3084). Przetworzone dane przesyłane są następnie przez dedykowane łącze równoległe do karty Advantech PCI-1751 w komputerze PC. Schemat podłączenia przedstawiony został na rysunku 3.4.

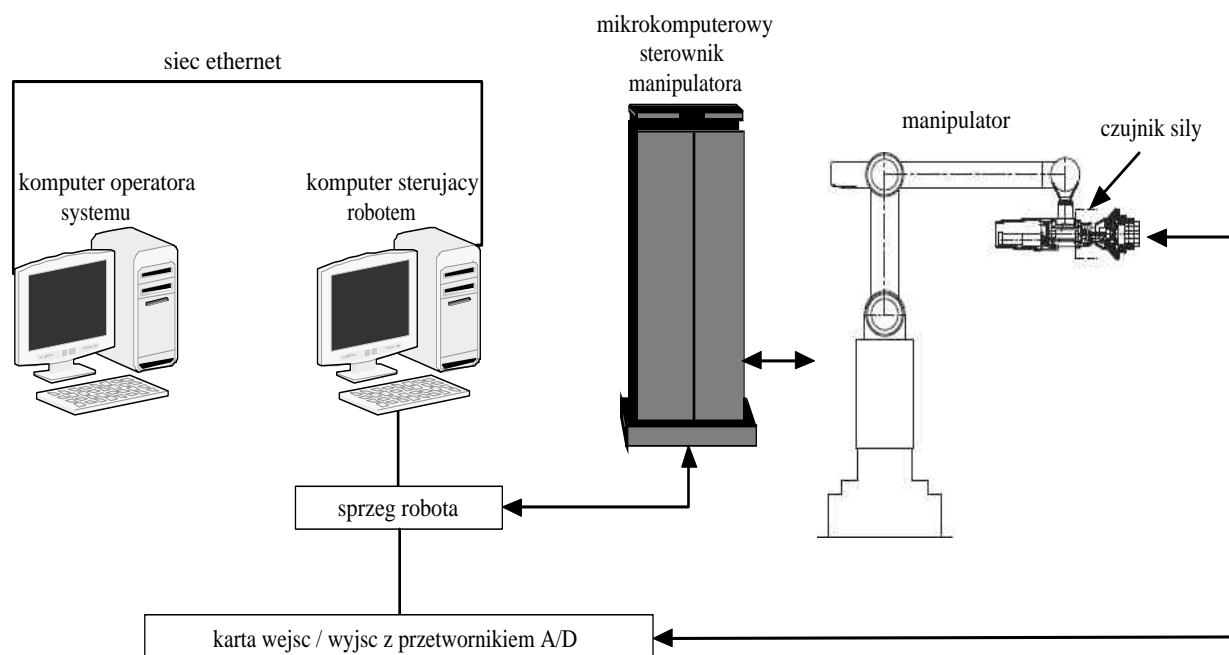


Rysunek 3.4: Podłączenie czujnika w przypadku manipulatora **on_track**

- **postument** - Tutaj całość przetwarzania odbywa się już w komputerze PC. Użyto tu karty akwizycji danych z przetwornikami analogowo-cyfrowymi firmy National Instruments. Celem takiego rozwiązania było znaczne uproszczenie komunikacji z czujnikiem. Schemat podłączenia przedstawiony został na rysunku 3.5.

3.3 Opis stanowiska ekeperymentalnego

Stanowisko robocze, miejsce w którym odbywały się wszystkie opisane w pracy eksperymenty znajduje się w laboratorium Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej na wydziale Informatyki i Technik Informatycznych. Dostępny jest tu różnorodny sprzęt, w tym przede wszystkim dwa przemysłowe roboty IRp-6 stosowane zwykle do automatyzacji różnych prac. To do nich przymocowane są czujniki siły i to one posłużyły do badań. Roboty te dla potrzeb laboratorium zostały nieznacznie zmodyfikowane. Wprowadzone ulepszenia to między innymi: przymocowanie czujnika siły w nadgarstku robota, dodanie kamery, specjalnie stworzony chwytak przystosowany do łapania obiektu jakim jest kostka Rubika. Manipulatory różnią się też jeden od drugiego. Pierwszy nazwany **on_track** posiada dodatkowy stopień swobody, jakim jest tor jezdny na którym został on umieszczony. Drugi ulokowany na podstawie jest go pozbawiony, w dalszej części pracy nazywany będzie **postument**. W trakcie prowadzonych badań tor jezdny nie był wykorzystywany tak więc roboty posiadały tę samą konfigurację mechaniczną. Opisywany robot składa się z części manipulacyjnej oraz szafy sterowniczej. Szafy sterownicze podłączone są natomiast do komputerów PC również znajdujących się w laboratorium. Sterowanie manipulatorami



Rysunek 3.5: Podłączenie czujnika w przypadku manipulatora **postument**

odbywało się przy wykorzystaniu systemu MRROC++ uruchomionego na systemie operacyjnym QNX. Tak zorganizowane stanowisko robocze pozwoliło na pracę badawczą.

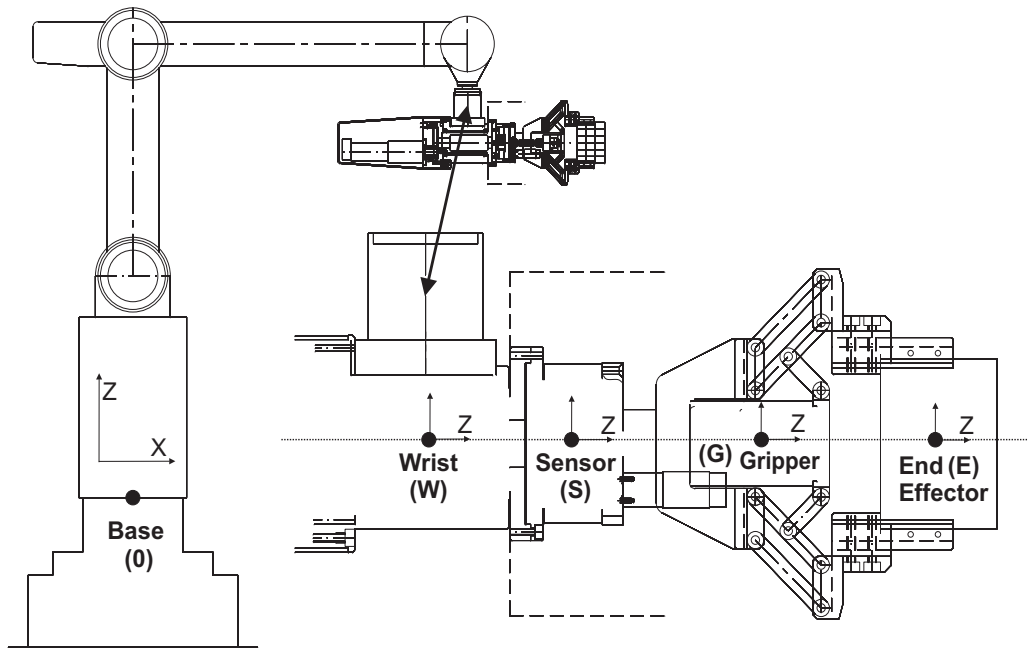
3.3.1 Struktura manipulatora i rozmieszczenie poszczególnych układów odniesienia

Rysunek 3.6 przedstawi strukturę zmodyfikowanego manipulatora IRp-6 (w tym przypadku wyposażonego w chwytak przeznaczony do podejmowania prostopadłościennych obiektów, np. kostki Rubika) wraz ze wskazanym miejscem umieszczenia samego czujnika oraz oznaczeniem poszczególnych układów odniesienia:

- 0 - baza (base),
- W - nadgarstek (wrist),
- S - czujnik siły (force sensor),
- G - układ o początku w środku ciężkości chwytaka (gripper) i orientacji zgodnej z układem nadgarstka
- E - końcówka manipulatora (end effector) inaczej układ zadania, może być predefiniowany w trakcie realizacji zadania.

Wprowadzone oznaczenia używane będą w dalszej części pracy przy odnoszeniu się do poszczególnych układów.

Jak widać przy takim umieszczeniu czujnika reagować on będzie tylko w sytuacji, gdy siła zadziała na układ chwytaka (G) czy końcówkę manipulatora (E), nie zareaguje natomiast gdy zadziała np. na



Rysunek 3.6: Struktura manipulatora i rozmieszczenie poszczególnych układów odniesienia

główną kolumnę manipulatora. Przyjmując, że interesuje nas precyzja w sterowaniu siłowym jest to bardzo dobre położenie. Przy takim typie sterowania ważnym będzie dla nas pomiar siły wywierany na końcówkę manipulatora.

3.4 Użyte transformacje matematyczne

Przedstawiony poniżej podrozdział opisujący szczegółowo stosowane przekształcenia zaczerpnięty został z pracy [4].

Pozycja układu Q względem układu U może być wyrażona przez macierz przekształcenia jednorodnego:

$${}^U_Q T = \begin{bmatrix} {}^U_Q R & {}^U_Q P \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

gdzie ${}^U_Q R$ jest macierzą o wymiarze 3×3 określającą orientację Q względem U , a ${}^U_Q P$ jest wektorem kolumnowym o wymiarze 3×1 określającym położenia początku układu Q względem U .

W MRROC++ położenie ramienia może być wyrażone w jednej z następujących reprezentacji:

- **MOTOR** – kąty obrotu wałów silników (liczba współrzędnych zależna jest od liczby silników),
- **JOINT** – kąty lub przemieszczenia stawów manipulatora (liczba współrzędnych zależna jest od liczby stawów i zwykle równa się liczbie silników),
- **XYZ ANGLE AND AXIS** – pozycja końcówki manipulatora (6 współrzędnych – położenie we współrzędnych kartezjańskich uzupełnione o kąt obrotu wokół osi, która jest reprezentowana przez wersor kierunkowy. Kąt obrotu i wersor kierunkowy są zagregowane do trzech współrzędnych rotacji poprzez przemnożenie wersora przez kąt obrotu).

Relacja pomiędzy układami U i Q może być wyrażona zarówno poprzez macierz przekształcenia jednorodnego U_QT jak i wektor kolumnowy ${}^U_Qr_{(X)}$, gdzie X jest etykietą określającą reprezentację: $X \in \{A, E, J, M\}$. Operator \mathcal{A} transformuje wektor kolumnowy w macierz jednorodną, natomiast operator \mathcal{A}^{-1} wykonuje operację odwrotną:

$$\mathcal{A}_X({}^U_Qr_{(X)}) = {}^U_QT, \quad \mathcal{A}_X^{-1}({}^U_QT) = {}^U_Qr_{(X)} \quad (3.4)$$

Wektor kolumnowy ${}^U\dot{r}_{(A)} = [{}^Uv^T, {}^U\omega^T]^T$ o wymiarze 6×1 reprezentuje prędkość uogólnioną układu U poruszającego się względem układu 0 , ale wyrażoną w U .

$${}^U({}^0_U\dot{r}_{(A)}) = {}^U\dot{r}_{(A)} \quad (3.5)$$

Wektor kolumnowy ${}^U\mathcal{F} = [{}^UF^T, {}^UN^T]^T$ o wymiarze 6×1 reprezentuje siłę uogólnioną i składa się z wektora siły F o wymiarze 3×1 i wektora momentu N o takim samym wymiarze. W tym wypadku U jest układem, do którego początku przyłożono siłę, oraz w którym wyrażono współrzędne tej siły. Znane są przekształcenia wyrażające prędkość lub siłę uogólnioną w jednym układzie w odniesieniu do innego układu sztywno związanego z tym pierwszym [2].

$${}^U\dot{r} = {}^U_Q\xi_V {}^Q\dot{r}, \quad {}^U\mathcal{F} = {}^U_Q\xi_F {}^Q\mathcal{F} \quad (3.6)$$

Macierze przekształcenia prędkości uogólnionej ${}^U_Q\xi_V$ i siły uogólnionej ${}^U_Q\xi_F$, są wyznaczane poprzez wykorzystanie odpowiednich elementów macierzy przekształcenia jednorodnego U_QT (3.3):

$${}^U_Q\xi_V = \begin{bmatrix} {}^U_QR & S({}^U_QP){}^U_QR \\ 0_{3 \times 3} & {}^U_QR \end{bmatrix}, \quad {}^U_Q\xi_F = \begin{bmatrix} {}^U_QR & 0_{3 \times 3} \\ S({}^U_QP){}^U_QR & {}^U_QR \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

gdzie $S(P_1)$ jest macierzą skośnosymetryczną wyznaczoną na podstawie wektora $P_1 = [p_x, p_y, p_z]^T$. Macierz $S(P_1)$ po przemnożeniu przez wektor P_2 daje iloczyn wektorowy $P_1 \times P_2$.

Niekiedy w przypadku wektorów swobodnych (np. przyrostów pozycji i orientacji, prędkości lub sił) istnieje potrzeba wyrażenia ich w odniesieniu do układu o innej orientacji niż ta, w której były pierwotnie wyrażone. W takiej sytuacji można zastosować notację ${}^C({}^U\dot{r})$, w której prędkość uogólniona układu U w odniesieniu do układu 0 jest wyrażona w układzie C . Poniżej zamieszczona jest definicja tej operacji:

$${}^C({}^U\dot{r}_{(A)}) = {}^C_U\xi_* {}^U\dot{r}_{(A)} = \begin{bmatrix} {}^C_U R & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & {}^C_U R \end{bmatrix} {}^U\dot{r}_{(A)} \quad (3.8)$$

Warto nadmienić, że ${}^C_U\xi_* = {}^C_U\xi_V = {}^C_U\xi_F$ dla ${}^C_U P = 0_{3 \times 1}$.

Ponadto przyjęto, że d oznacza wartość zadaną, natomiast m – wartość zmierzoną, jeżeli oznaczenia te umieszczone są jako prawo dolne indeksy przy symbolu położenia, prędkości lub siły uogólnionej.

3.5 Rozważane modele wykorzystywane opisujące manipulator i czujnik siły

Podczas prac badane były modele geometryczne opisujące manipulator, a także model czujnika siły. Ich niedokładności mogą wpływać na uzyskiwanie błędnych odczytów z czujnika sił:

- model kinematyki ${}^0_W T$,
- położenie czujnika względem nadgarstka ${}^W_S T$,
- położenie środka ciężkości względem nadgarstka ${}^W_G P$ i ciężar narzędzia,
- parametry kalibracyjne opisujące model czujnika.

Model kinematyki - w skład manipulatora wchodzi szereg sztywnych ogniw (członów) połączonych przegubami. Tak połączone ogniwa tworzą strukturę kinematyczną.

Zagadnienie kinematyki robotów polega na obliczeniu wymaganego położenia, ustawienie silników poruszających poszczególnymi członami tak aby uzyskać zadaną orientację końcówki robota w przestrzeni. Wyróżniamy dwa zadania kinematyki:

- **proste zadanie kinematyki** - polega na obliczeniu pozycji końcówki robota względem układu bazowego na podstawie długości ogniw oraz kątów pomiędzy nimi,
- **odwrotne zadanie kinematyki** - polega na obliczeniu takiego ustawienia w przestrzeni poszczególnych członów robota aby końcówka osiągnęła zadaną pozycję. Zagadnienie to jest znacznie trudniejsze od prostego zadania kinematyki, może posiadać wiele rozwiązań. Daną pozycję końcówki można osiągnąć przez szereg różnych ustawień poszczególnych członów. Jednocześnie w zadaniu tym nie uwzględniany jest obszar roboczy robota, jego ograniczenia oraz położenia osobliwe.

Położenie czujnika względem nadgarstka ${}^W_S T$ - model ten określa kolejno przesunięcia czujnika względem nadgarstka w osiach x , y , z oraz jego orientację.

Położenie środka ciężkości względem nadgarstka ${}^W_G P$ i ciężar narzędzia - Podstawowym celem niniejszej pracy było stworzenie procedury wyznaczającej parametry tego modelu:

- wagi narzędzia ω (wyrażonej w Newtonach),
- trzech translacji (przesunięć) narzędzia względem chwytaka ${}^W_G P$ po jednej dla każdej z osi (wyrażonych w metrach).

Parametry kalibracyjne opisujące model czujnika - jest to zbiór parametrów kalibracyjnych opisujących model czujnika dostarczonych przez producenta urządzenia, firmę ATI. Parametry te zebrane są w dołączonym do czujnika xml'owym pliku konfiguracyjnym którego zawartość przedstawiona została na listingu 3.1.

Listing 3.1: ft6284.cal

```

1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2 <!-- NOTE: To ensure compatibility between your software and future F/T calibrations -->
3 <!-- (such as recalibrations of your transducer or future purchases), -->
4 <!-- ATI does not support parsing of this file. The only supported methods for -->
5 <!-- loading calibration data are the ATIDAQFT ActiveX component and the -->
6 <!-- ATI DAQ F/T C Library. -->

```

```
7 <FTSensor Serial="FT6284" BodyStyle="Gamma" Family="DAQ" NumGages="6" CalFileVersion="1.0">
8 <Calibration PartNumber="SI-65-5" CalDate="7/21/2005" ForceUnits="N" TorqueUnits="N-m"
9 DistUnits="m" OutputMode="Ground_Referenced_Differential" OutputRange="20" HWTempComp="True"
10 GainMultiplier="1" CableLossDetection="False" OutputBipolar="True">
11 <Axis Name="Fx" values="_-0.40709_ _-0.27318_ _ _0.34868_ _-33.58156_ _-0.32609_ _33.54162_" max="65"
12 scale="4.5511972116989"/>
13 <Axis Name="Fy" values="_ _0.35472_ _38.22730_ _-0.41173_ _-19.49156_ _ _0.49550_ _-19.15271_" max="65"
14 scale="4.5511972116989"/>
15 <Axis Name="Fz" values="_18.72635_ _-0.59676_ _19.27843_ _-0.56931_ _18.69352_ _-0.67633_" max="200"
16 scale="1.41244051397552"/>
17 <Axis Name="Tx" values="_ -0.40836_ _-0.95908_ _-33.37957_ _ _1.38537_ _32.52522_ _-0.51156_" max="5"
18 scale="84.8843245576086"/>
19 <Axis Name="Ty" values="_37.13715_ _-1.02875_ _-20.00474_ _-0.27959_ _-19.34135_ _ _1.42577_" max="5"
20 scale="84.8843245576086"/>
21 <Axis Name="Tz" values="_ -0.15775_ _-18.16831_ _-0.00133_ _-18.78961_ _ _0.31895_ _-18.38586_" max="5"
22 scale="80.9472037525247"/>
23 <BasicTransform Dx="0" Dy="0" Dz="0.0134355078" Rx="0" Ry="0" Rz="0"/>
24 </Calibration>
25 </FTSensor>
```


Rozdział 4

Model symulacyjny transformacji sił

4.1 Wprowadzenie

Stworzony model symulacyjny opisuje część robota odpowiedzialną za pomiar sił. W całości zdefiniowany został w środowisku MatLab. Stworzenie go wynikało z potrzeby posiadania narzędzia, które pozwoli nam w środowisku symulacyjnym uzyskać takie wyniki, do których będziemy mogli się później odnieść analizując pomiary w rzeczywistym systemie robotycznym. Przechodząc dokładniej do tego co zostało zamodelowane trzeba przede wszystkim powiedzieć o dwóch głównych procedurach:

- procedurze odpowiedzialnej za wyznaczenie czynnika kompensującego,
- procedurze odpowiedzialnej za wyznaczenie wartości skorygowanej siły uogólnionej.

4.2 Podstawa teoretyczna

Procedura wyznaczania czynnika kompensującego wykonywana jest zaraz po tym jak wprowadzone zostaną nowe parametry charakteryzujące ciężar chwytaka ω oraz położenie jego środka ciężkości ${}^W_G P$. Wykonywana jest w indeksowanej chwili i_c . Wiadomo, że takie parametry jak model kinematyczny manipulatora, parametry środka ciężkości narzędzia oraz kalibracja czujnika siły są niedokładne. Dlatego procedura korygująca odczyty sił jest stosunkowo dokładna jedynie dla takiej orientacji końcówki manipulatora, która jest zbliżona do orientacji w której mamy ostatnio wyznaczony czynnik kompensujący. Z tego względu obliczanie czynnika kompensującego przeprowadzane jest również wówczas, gdy mamy taką sytuację, że wymagamy dużej dokładności korekcji sił, a bieżąca orientacja jest inna niż ta w której ostatnio wyznaczaliśmy czynnik kompensujący. Warto zaznaczyć, że wyznaczeniu tego czynnika towarzyszy zerowanie poziomu odczytów z czujnika, które może być wykonywane jedynie przy braku kontaktu narzędzia z otoczeniem. Poszukiwany czynnik kompensujący w układzie nadgarstka wyrażamy przy pomocy następującej formuły:

$${}^{W^{i_c}} \mathcal{F}_r^{i_c} = -{}_{G^{i_c}}^{W^{i_c}} \xi_{\mathcal{F}} \quad {}^{G^{i_c}} \mathcal{F}_g^{i_c} = -{}_{G^{i_c}}^{W^{i_c}} \xi_{\mathcal{F}} \begin{matrix} G^{i_c} \\ 0 \end{matrix} \xi_* \begin{matrix} 0 \\ G^{i_c} \end{matrix} \mathcal{F}_g^{i_c} \quad (4.1)$$

gdzie:

- $W^{ic} \mathcal{F}_r^{ic}$ - uogólniona siła reakcji na siłę grawitacji czyli poszukiwany czynnik kompensujący dla chwili indeksowanej i_c ,
- $W^{ic}_{G^{ic}} \xi_{\mathcal{F}}$ - macierz transformująca uogólnione siły działające na środek ciężkości chwytaka G do układu W związanego z nadgarstkiem, jest ona wyznaczona na podstawie macierzy $W^{ic}_{G^{ic}} T$, która to wynika bezpośrednio z mechanicznej końcówki manipulatora (relacji geometrycznej pomiędzy chwytakiem i nadgarstkiem), jest niezmienna podczas wykonywania zadania,
- $G^{ic}_0 \xi_*$ - macierz obrazująca relacje pomiędzy układem chwytaka G, a układem bazowym 0,
- $^0_{G^{ic}} \mathcal{F}_g^{ic}$ - wektor uogólnionej siły grawitacji działającej na środek ciężkości chwytaka G wyrażony w układzie bazowym 0, ma on następującą postać: $[0, 0, -\omega, 0, 0, 0]^T$, gdzie ω jest ciężarem narzędzia.

Szczegółowa budowa macierzy $G^{ic}_0 \xi_*$ oraz $W^{ic}_{G^{ic}} \xi_{\mathcal{F}}$ opisana została w podrozdziale 3.4.

Procedura wyznaczająca wartość skorygowanej siły uogólnionej wykonywana jest co krok oznaczony w poniższych wzorach przez ι . Sprowadza się ona do tego, że następujące podczas wykonywania ruchu odczyty siły uogólnionej \mathcal{F}_m^ι są zniekształcane o wyliczoną wcześniej wartość czynnika kompensującego $W^{ic} \mathcal{F}_r^{ic}$. Wprowadzony we wzorze 4.2 znak minus służy do sprowadzenia odczytów sił do układu związanego z manipulatorem, a nie otoczeniem.

$$W^\iota \mathcal{F}_a^\iota = - (W^\iota \mathcal{F}_m^\iota - W^\iota \mathcal{F}_g^\iota - W^{ic} \mathcal{F}_r^{ic}) = - (S^\iota \xi_{\mathcal{F}} S^\iota \mathcal{F}_m^\iota - W^\iota \xi_{\mathcal{F}} G^\iota \xi_* \ ^0_{G^\iota} \mathcal{F}_g^\iota - W^{ic} \mathcal{F}_r^{ic}) \quad (4.2)$$

gdzie:

- $W^\iota_{S^\iota} \xi_{\mathcal{F}}$ - macierz transformująca pomiar siły uogólnionej z układu S związanego z czujnikiem do układu W związanego z nadgarstkiem, wyznaczana jest ona na podstawie macierzy $W^\iota_S T$, która to wynika bezpośrednio z geometrycznej struktury końcówki manipulatora (wzajemnego położenia nadgarstka i czujnika),
- $S^\iota \mathcal{F}_m^\iota$ - bieżący odczyt sił uzyskany bezpośrednio z czujnika siły,
- $W^\iota_{G^\iota} \xi_{\mathcal{F}}$ - macierz transformująca uogólnione siły działające na środek ciężkości chwytaka G do układu W związanego z nadgarstkiem,
- $G^\iota_0 \xi_*$ - macierz obrazująca relacje pomiędzy układem chwytaka G, a układem bazowym 0,
- $^0_{G^\iota} \mathcal{F}_g^\iota$ - bieżące oddziaływanie siły grawitacji,
- $W^{ic} \mathcal{F}_r^{ic}$ - wartość obliczonego czynnika kompensującego „zapisana” w interfejsie czujnika podczas operacji BIAS (zerowania odczytów) w indeksowanej chwili i_c .

Szczegółowa budowa macierzy $G^{ic}_0 \xi_*$ oraz $W^{ic}_{G^{ic}} \xi_{\mathcal{F}}$ opisana została w podrozdziale 3.4.

4.3 Implementacja

Podczas implementacji omawianego w tym rozdziale modelu, w środowisku MatLab powstało kilka funkcji które postaram się tu przedstawić.

- **modelSilaFun** - Jest to główna funkcja stworzonego modelu. Najpierw określamy kolejne trajektorie dla ruchu. Przykładowe użyte w eksperymencie można zobaczyć na listingu 4.1.

Listing 4.1: trajektorie

```

1 trj_1 = [0 0 -pi/2 0 0 -pi/2 pi/2 0.07]; %gora
2 trj_2 = [0 0 -pi/2 0 0 pi/2 pi/2 0.07]; %dol
3 trj_3 = [0 0 -pi/2 0 pi/2 pi/2 pi/2 0.07]; %prosto
4 trj_4 = [0 0 -pi/2 0 pi/2 pi pi/2 0.07]; %lewo
5 trj_5 = [0 0 -pi/2 0 pi/2 0 pi/2 0.07]; %prawo
6 trj_6 = [0 0 -pi/2 0 -pi/2 pi/2 pi/2 0.07]; %tyl

```

Manipulator, dostając kolejne zdefiniowane w zadaniu trajektorie powinien poruszać się w ten sposób, że jego końcówka osiągnie każdą z 6 możliwych orientacji. Następnie wyznaczamy macierze ${}^W_G \xi_{\mathcal{F}}$ oraz ${}^W_S \xi_{\mathcal{F}}$, które jak wiemy ze wzorów 4.1 i 4.2 są nam potrzebne do dokonania niezbędnych przekształceń. Kolejnym krokiem jest wyznaczenie dla pierwszej z sześciu pozycji wartości czynnika kompensującego i wyzerowanie poziomu odczytów sił. Następnie kolejno wykonywane są następujące po sobie operacje: odczyt wartości uogólnionej siły skorygowanej i zmiana orientacji końcówki manipulatora. Wyliczone wartości siły uogólnionej przedstawiane są użytkownikowi.

- **reaction_force** - Funkcja ta odpowiada za obliczenie wartości czynnika kompensacyjnego dla danej orientacji końcówki. Obliczenia te oparte są na wzorze 4.1.
- **getForce** - Funkcja ta odpowiada za obliczenie wartości uogólnionej siły skorygowanej. Wszystkie obliczenia oparte są na wzorze 4.2.
- **directKinematic** - Funkcja ta odpowiada za policzenie prostego zadania kinematyki, podajemy jej zadaną pozycję w przestrzeni stawów, a uzyskujemy wyjściowe położenie i orientację końcówki.
- Do tego powstał jeszcze szereg funkcji pomocniczych: **check_joints**, **check_zero**, **ft_v_tr**, **get_rotation_matrix**, **homog_matrix**, **homog_matrix_blank**, **homog_matrix_remove_translation**, **makeSWMatrix**, **makeWSMatrix**, **przekształcenie_odwrotne**, **reduce_ang** - Wykonują one różne zadania pomocnicze takie jak: sprawdzenie zakresu obrotów, tworzenie odpowiednich macierzy oraz inne operacje matematyczne.

4.4 Test modelu

Pierwszą czynnością dokonaną po stworzeniu modelu było jego wstępne przetestowanie. W tym celu przeprowadzony został prosty i krótki eksperyment polegający na tym, że zarówno dla modelu jak i rzeczywistego robota uruchomiona została taka sama procedura. Ruch manipulatora odbywał się po

takiej samej trajektorii. Ostatecznie celem testu było sprawdzenie zgodności odczytów z modelu i tych uzyskanych z rzeczywistego czujnika. Odczyty otrzymane z czujnika rzeczywistego przedstawiają się następująco 4.1

	F_x	F_y	F_z	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	-0.515133	-0.517368	-0.6675	0.0730576	-0.068069	-0.00225
pozycja 2	-0.307485	-0.402598	26.8125	-0.0396324	-0.0360669	-0.00589995
pozycja 3	-14.1125	-0.852001	13.6527	0.0365732	-1.84698	-0.0561336
pozycja 4	-14.2127	-0.786944	13.6575	0.0242723	-1.85423	-0.0599282
pozycja 5	-14.0952	-0.847064	13.7125	0.0364373	-1.84611	-0.0542276
pozycja 6	13.8927	0.202337	13.8298	-0.0551266	1.83104	0.0479285

Tablica 4.1: Odczyty z czujnika rzeczywistego

Natomiast odczyty uzyskane ze stworzonego modelu symulacyjnego transformacji sił obrazuje poniższa tabela 4.2

	F_x	F_y	F_z	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0	0	0	0
pozycja 2	0	0	26.794	-0.009199157226	0.018930255734	0
pozycja 3	-13.397	0	13.397	-0.004599578613	-1.841692141133	-0.004599578613
pozycja 4	-13.397	0	13.397	-0.004599578613	-1.841692141133	-0.004599578613
pozycja 5	-13.397	0	13.397	-0.004599578613	-1.841692141133	-0.004599578613
pozycja 6	13.397	0	13.397	-0.004599578613	1.860622396867	0.004599578613

Tablica 4.2: Odczyty uzyskane ze stworzonego modelu

Porównując odczyty otrzymane dla modelu rzeczywistego z tymi uzyskanymi przy pomocy stworzonego modelu można stwierdzić, że w tym wypadku model działa poprawnie. W pewnym przybliżeniu daje takie same wyniki jak rzeczywisty eksperyment. Różnice na poziomie około 0.5N wynikają z niedokładności, m.in. wykorzystania rzeczywistego czujnika, których to model symulacyjny nie uwzględnia.

Rozdział 5

Procedura wyznaczania modelu środka ciężkości narzędzia

5.1 Algorytm

5.1.1 Procedura podstawowa

Proponowana procedura wyznaczania modelu środka ciężkości składa się z trzech głównych kroków, każdy z nich określony jest przez inne ustawienie ramienia manipulatora. Ważne jest też aby przed przeprowadzaniem pomiarów ustawić układ końcówki manipulatora E jako układ chwytaka W. Ma to na celu sprowadzenie pomiarów do układu, który jest niezależny od definicji narzędzia.

Trzy kolejne kroki procedury przedstawiają się następująco:

- Ustawienie ramienia robota skierowanego pionowo „ku dołowi” wzdłuż osi z jak pokazano na rysunku 5.1. W położeniu tym dokonujemy wyzerowania odczytu sił. Po tej operacji wektor odczytu sił z czujnika czyli zarówno wartości sił jak i momentów powinny mieć wartość zero $\mathcal{F} = 0_{6 \times 1}$.
- Ustawienie ramienia robota skierowanego pionowo „ku górze” wzdłuż osi z jak pokazano na rysunku 5.2. Teraz możemy w dość prosty sposób obliczyć wagę narzędzia przytwierdzonego do czujnika:

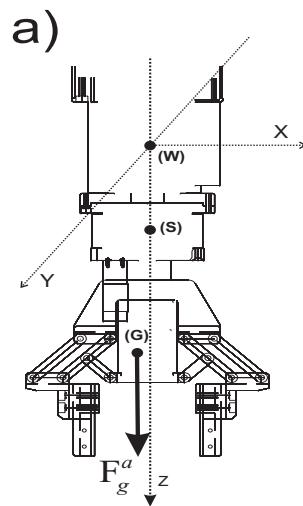
$$\omega = \frac{{}^W F_{g[z]}^b}{2} \quad (5.1)$$

gdzie:

${}^W F_{g[z]}^b$ - jest siłą zmierzoną przez czujnik. Jej kierunek i zwrot można zaobserwować na rysunku 5.2.

Przesunięcia dla osi x ${}^W P_{[x]}$ i y ${}^W P_{[y]}$ wyznaczamy w tej samej fazie procedury. Dokonujemy tego przy zastosowaniu następujących formuł:

$${}^W P_{[x]} = -\frac{{}^W N_{a[a_y]}^b}{2\omega}, \quad {}^W P_{[y]} = \frac{{}^W N_{a[a_x]}^b}{2\omega} \quad (5.2)$$

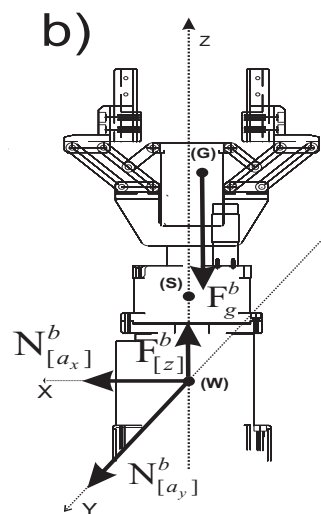


Rysunek 5.1: Pozycja 1

gdzie:

${}^W N_{a[a_x]}^b$ - jest momentem siły dla układu chwytaka wokół osi x .

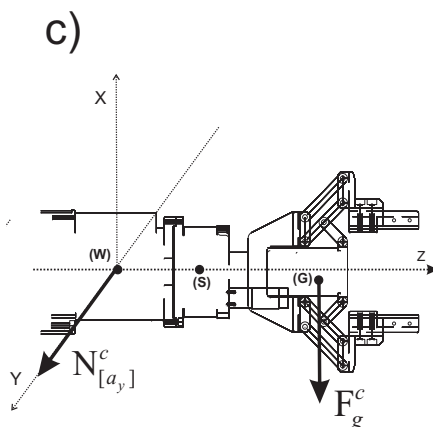
${}^W N_{a[a_y]}^b$ - jest momentem siły dla układu chwytaka wokół osi y .



Rysunek 5.2: Pozycja 2

- Ostatnią fazą procedury jest ustawienie ramienia robota w poziomie (horyzontalnie). W pozycji tej obie osie x oraz y znajdują się w płaszczyźnie horyzontalnej. Jest to moment w którym wyznaczamy ostatni z parametrów modelu czyli przesunięcie czujnika wzdłuż osi z ${}^W P_{[z]}$. Służy nam do tego następująca formuła:

$${}^W P_{[z]} = \frac{{}^W N_{a[a_y]}^c}{\omega} - \frac{{}^W N_{a[a_y]}^b}{2\omega} \quad (5.3)$$



Rysunek 5.3: Pozycja 3

gdzie:

${}^W N_{a_{[a_y]}}^c$ - jest momentem siły dla układu chwytaka wokół osi y .

5.1.2 Procedura alternatywna

Model środka ciężkości można również wyznaczyć wykonując inną sekwencję ruchów niż w uprzednio przedstawionej procedurze podstawowej. Przykładowa alternatywna procedura może wyglądać tak:

- Ustawienie ramienia robota w ten sposób, że osie y oraz z leżą w jednej płaszczyźnie poziomej natomiast oś x skierowana jest pionowo ku dołowi. Dokonywane jest wyzerowanie odczytów sił.
- Ustawienie ramienia robota w taki sposób, że osie y oraz z znowu leżą w jednej poziomej płaszczyźnie tylko tym razem oś z skierowana jest pionowo ku górze. Teraz możemy w dość prosty sposób obliczyć wagę narzędzia przytwierdzonego do czujnika:

$$\omega = \frac{{}^W F_{g[x]}^b}{2} \quad (5.4)$$

gdzie:

${}^W F_{g[x]}^b$ - jest siłą zmierzoną przez czujnik.

Przesunięcia dla osi y ${}^W_G P_{[y]}$ i z ${}^W_G P_{[z]}$ wyznaczamy w tej samej fazie procedury. Dokonujemy tego przy zastosowaniu następujących formuł:

$${}^W_G P_{[z]} = -\frac{{}^W N_{a_{[a_y]}^b}}{2\omega}, \quad {}^W_G P_{[y]} = \frac{{}^W N_{a_{[a_z]}^b}}{2\omega} \quad (5.5)$$

gdzie:

${}^W N_{a_{[a_y]}^b}$ - jest momentem siły dla układu chwytaka wokół osi y .

${}^W N_{a_{[a_z]}^b}$ - jest momentem siły dla układu chwytaka wokół osi z .

- Ostatnią fazą procedury jest ustawienie ramienia w pozycji takiej, że obie osie y oraz z znajdują się w płaszczyźnie horyzontalnej. Jest to moment, w którym wyznaczamy ostatni z parametrów modelu czyli przesunięcie czujnika wzdłuż osi z ${}^W_G P_{[x]}$. Służy nam do tego następująca formuła:

$${}^W_G P_{[x]} = \frac{{}^W N_{a[a_y]}^c}{\omega} - \frac{{}^W N_{a[a_y]}^b}{2\omega} \quad (5.6)$$

gdzie:

${}^W N_{a[a_y]}^c$ - jest momentem siły dla układu chwytaka wokół osi y .

W praktyce parametry zidentyfikowane różnymi wariantami procedury różniły się. Szczególnie widoczne było to w robocie postument co zostało opisane w rozdziale 6.3.

5.2 Implementacja

5.2.1 Procedura wyznaczania modelu środka ciężkości narzędzia

Do wykonania procedury opisanej powyżej stworzone zostało zadanie ECP, które może być uruchomiane na obu robotach znajdujących się w laboratorium (**on_track** oraz **postument**). Główny plik, w którym zostało ono zdefiniowane to *ecp_t_tzu_fs.cc*. Implementacja zadania polegała na odpowiednim skomponowaniu napisanych wcześniej i specjalnie stworzonych na potrzeby tej pracy generatorów:

- **ecp_smooth_generator** - generator służący do ruszania manipulatorem, przy użyciu funkcji *load_file_with_path* podajemy ścieżkę do pliku, który zawiera trajektorię ruchu, a następnie wywołując funkcję *Move* poruszamy manipulator do zadanej pozycji.

Plik trajektorii zawiera takie parametry jak:

- prędkość początkowa,
- prędkość końcowa,
- prędkość maksymalna,
- przyspieszenie,
- koordynaty.

Przykładowy plik trajektorii przedstawiony został na listingu 5.1.

Listing 5.1: tzu_1.trj

```

1 JOINT
2 1
3 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 // vp
4 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 // vk
5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 1.0 // v
6 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.01 // a
7 0.0 0.0 -1.570796325 0.0 0.0 -1.570796325 -1.570796325 0.07 // koordynaty

```

- **bias_edp_force_generator** - generator służący do wyzerowania odczytów czujnika, po jego wywołaniu wektor odczytów sił wygląda następująco $\mathcal{F} = 0_{6 \times 1}$.

- ***force_meassure_generator*** - generator służący do odczytów siły z czujnika, zwraca sześciopunktowy wektor sił składający się z następujących elementów:

$$\mathcal{F} = \begin{bmatrix} F_{3 \times 1} \\ N_{3 \times 1} \end{bmatrix}$$

gdzie:

F to wektor 3×1 trzech składowych siły dla osi x , y , z

N to wektor 3×1 trzech składowych momentów siły wokół osi x , y , z

- ***ecp_tool_change_generator*** - generator służący do ustawienia nowych parametrów narzędzia, jego przesunięcia w osiach x , y oraz z . Użyty został do ustawienia układu końcówki manipulatora E jako układ chwytaka W. Zrobione to zostało poprzez zmianę przesunięcia narzędzia w osi z .

Stworzona procedura kończy się wyznaczeniem, a następnie wypisaniem czterech parametrów środka ciężkości narzędzia. Parametry te mogą zostać przesłane do EDP za pomocą dodatkowego generatora ***ecp_force_tool_generator***.

Koordinaty służące do określania ustawień manipulatora podawane zostały przy użyciu notacji JOINT[3.4]. Stosowanie jej polega na podawaniu kąta o jaki ma zostać obrócony kolejny ze stopni swobody robota. Poszczególne ustawienia manipulatora uzyskane zostały przy użyciu takich oto koordynatów:

- Ustawienie ramienia robota skierowanego pionowo „ku dołowi” wzdłuż osi z

Listing 5.2: tzu_1.trj

```
1 ...
2 0.0 0.0 -1.570796325 0.0 0.0 -1.570796325 -1.570796325 0.07
```

- Ustawienie ramienia robota skierowanego pionowo „ku górze” wzdłuż osi z

Listing 5.3: tzu_2.trj

```
1 ...
2 0.0 0.0 -1.570796325 0.0 0.0 1.570796325 -1.570796325 0.07
```

- Ustawienie ramienia robota w poziomie (horyzontalnie)

Listing 5.4: tzu_3.trj

```
1 ...
2 0.0 0.0 -1.570796325 0.0 1.570796325 1.570796325 -1.570796325 0.07
```

Podczas prac niezwykle przydatny okazał się powstały niedawno symulator 3D. Dał on możliwość przećwiczenia wszystkich potrzebnych ruchów przed przystąpieniem do działań z prawdziwym robotem. Pozwoliło to oszczędzić znaczną ilość czasu i ułatwić pracę ponieważ część zadań mogła zostać wykonana bez użycia prawdziwego sprzętu.

Stworzone oprogramowanie powstało zgodnie ze schematem dodawania nowego zadania do systemu. Oprócz pliku z definicją zadania powstał również plik konfiguracyjny `tzu.ini` o następującej strukturze:

Listing 5.5: `tzu.ini`

```

1  [ui]
2  is_irp6_on_track_active=1
3  is_irp6_postument_active=0
4  is_conveyor_active=0
5  is_mp_and_ecps_active=1
6
7  [mp]
8  program_name=mp_c
9  node_name=tomek      // nazwa mojego domowego komputera, zmieniane w laboratorium
10
11 [ecp_irp6_on_track]
12 program_name=ecp_tzu
13 node_name=tomek
14 tryb=2
15 number_of_vsp=0
16
17 [edp_irp6_on_track]
18 test_mode=1          // ustawiane na 0 gdy ma być uruchomione na robocie
19 node_name=tomek      // nazwa mojego domowego komputera, zmieniane w laboratorium

```

5.2.2 Procedura testująca

Oprócz procedury zajmującej się wyznaczeniem modelu środka ciężkości narzędzia przytwierdzonego do czujnika powstała procedura testująca wyznaczony model. Po jej uruchomieniu mogliśmy wybrać jedno z trzech oferowanych zadań:

- **StandardTest** - w tym wariantcie wykonywany zostaje szereg przesunięć i obrotów końcówki manipulatora. Trajektorie tych przesunięć oraz ilość powtórzeń procedury dane są wcześniej. Odczyty sił uzyskiwane w czasie jej działania wypisywane są użytkownikowi zarówno na ekran jak i zapisywane są do wcześniej określonego pliku. Przed rozpoczęciem ruchu ustawiany jest jeszcze przy pomocy generatora *ecp_tool_change_generator* model środka ciężkości który zamierzamy testować. Ruch odbywa się przy wykorzystaniu generatora *ecp_smooth_generator*. Kolejne odczyty z czujnika siły uzyskujemy używając generatora *force_meassure_generator*. Funkcja ta wykorzystywana była podczas testowania nowo wyznaczonego modelu środka ciężkości 5.3.3 oraz do testów zaburzeń modelu położenia czujnika względem nadgarstka ${}^W T_S$ 6.2.
- **NoseGeneratorTest** - w funkcji tej na samym początku końcówka manipulatora zostaje przemieszczona do zadanej pozycji dzięki użyciu generatora *ecp_smooth_generator*. Następnie, gdy już się tam znajdzie ustawiany jest dany model środka ciężkości, robi się to używając stworzonej do tego funkcji *ecp_tool_change_generator*. Ostatnią fazą jest uruchomienie generatora *ecp_tff_nose_run_generator*. Wówczas manipulator reaguje na przykładaną do niego siłę pozwalając na ręczne przesuwanie, obracanie nim. Ta możliwość była wykorzystywana między innymi przy pierwszych testach uzyskanego ze stworzonej procedury modelu środka ciężkości 5.3.3.

- **NaciskTest** - w tym wariancie manipulator ustawiony zostaje do zadanej pozycji dzięki generatorowi *ecp_smooth_generator*, a następnie w niej pozostaje. W tym czasie cały czas zbierane są odczyty z czujnika siły i wypisywane na ekran. Do zbierania odczytów użyty został generator *force_meassure_generator*. Użytkownik dzięki temu widzi jak wprowadzany nacisk przekłada się na odczyty z czujnika siły. Funkcja ta wykorzystana została między innymi do testu podczas którego wykonywaliśmy pomiaru wagi ciężarków umieszczanych na chwytaku 6.4.

5.3 Model środka ciężkości nieobciążonego narzędzia

5.3.1 Model środka ciężkości - dla robota on_track

Zadanie wyznaczania modelu środka ciężkości polegało na 10-krotnym uruchomieniu procedury pomiarowej w wariancie podstawowym (StandardTest). Ostateczny model określony został poprzez uśrednienie uzyskanych wyników. Wszystkie pomiary przedstawione zostały w tabeli 5.1.

	waga	przesunięcie x	przesunięcie y	przesunięcie z
pomiar 1:	13.31	-0.000393656	-0.000707103	0.139422
pomiar 2:	13.3662	-0.00056686	-0.000618047	0.138688
pomiar 3:	13.3837	-0.00103866	-0.000420075	0.138604
pomiar 4:	13.3962	-0.000897636	6.17526e-05	0.138122
pomiar 5:	13.39	-0.000555461	-2.41626e-05	0.138027
pomiar 6:	13.4125	-0.00053968	-0.000324216	0.137637
pomiar 7:	13.4262	-0.00110887	-0.000174803	0.138248
pomiar 8:	13.4375	-0.000561014	-0.000417563	0.137626
pomiar 9:	13.405	-0.000635119	-0.000457723	0.137837
pomiar 10:	13.4425	-0.000768156	-0.000351347	0.137561
średnio:	13.397	-0.000706511	-0.000343329	0.138177

Tablica 5.1:

5.3.2 Model środka ciężkości - dla robota postument

Wyznaczony model środka ciężkości przedstawiony został w tabeli 5.2.

	waga	przesunięcie x	przesunięcie y	przesunięcie z
pomiar 1:	13.1567	-0.00494872	-0.000223463	0.159294
pomiar 2:	13.2633	-0.00429097	-5.36125e-05	0.156528
pomiar 3:	13.0981	-0.0050742	-0.000549416	0.15918
pomiar 4:	13.1112	-0.00520086	-0.00115667	0.159101
pomiar 5:	12.9993	-0.00575369	-0.000912367	0.160623
pomiar 6:	13.1266	-0.00507827	-0.00120023	0.158478
pomiar 7:	13.0853	-0.00519124	-0.00119318	0.15935
pomiar 8:	13.1102	-0.0054757	-0.00151404	0.158932
pomiar 9:	13.1505	-0.00529009	-0.00171298	0.158616
pomiar 10:	13.1384	-0.00527429	-0.00164172	0.15857
średnio:	13.124	-0.0051578	-0.00101577	0.158867

Tablica 5.2:

5.3.3 Testy

Pierwszy test jaki został wykonany miał charakter poglądowy i używał generatora *ecp_tff_nose_run_generator*. Generator ten działa w taki sposób, że reaguje na przykładaną do narzędzia manipulatora siłę pozwalając na ręczne przesuwanie i obracanie nim.

W przypadku gdyby wyznaczony model środka ciężkości okazał się idealny to po wykonaniu jakiegokolwiek obracania oraz przesuwania, a następnie puszczeniu manipulatora, wskazania odczytów czujnika powinny wynosić zero. Po takiej operacji manipulator powinien pozostać w miejscu i nie przemieszczać się, ze względu na to że nie działałaby na niego żadna siła. Jedyną działającą siłą to siła grawitacji która jest kompensowana przez odpowiednie procedury mieszczące się w procesie EDP. Należy zauważyć, że procedury te wykorzystują parametry badanego modelu środka ciężkości narzędzia.

Natomiast w przypadku gdyby wyznaczony model środka ciężkości okazał się błędny to np. wykonanie obracania mogłoby sprawić, że na jednej z osi odłożył się jakiś niezerowy moment siły bądź siła. Puszczenie robota w takim przypadku spowodowałoby, że zacząłby on „odpływać” w którymś z kierunków. Kierunek, zwrot oraz prędkość takiego „odpływania” zależałyby ściśle od tego jakie mamy odczyty z czujnika siły i na których osiach są one niezerowe.

Wynik testu:

- **on_track** - wykonanie tego testu przyniosło pozytywny skutek. Manipulator odpływał, ale robił to na tyle wolno, że mogliśmy przyjąć wyznaczony model za akceptowalny.
- **postument** - dla tego manipulatora wyniki testu nie były już takie dobre, robot wyraźniej „odpływał”. Przeprowadzone w rozdziale 6 eksperymenty pokazały, że problem tkwi głębiej i bardzo możliwe, że występuje w warstwie odpowiadającej za kalibrację czujnika.

Kolejny test modelu środka ciężkości nie wymagał już interwencji człowieka. Był on w gruncie rzeczy bardzo podobny do poprzedniego, jednakże rezultaty tu otrzymane miały wymierny charakter. Manipulator wykonywał 10 różnych przesunięć i obrotów mających na celu sprawdzenie jakości tego modelu. Sekwencja 10 ruchów powtórzona została 5 krotnie. Wyniki, jakich oczekiwaliśmy po przeprowadzeniu tego eksperymentu to odczyty bliskie zera. Powinno tak być, ponieważ jak już pisałem w poprzednim akapicie dla dobrze wyznaczonego modelu oddziaływanie siły grawitacji powinno być całkowicie kompensowane. Brak spełnienia tego warunku znacznie utrudnia precyzyjne sterowanie siłowe, do którego staramy się dążyć.

Ze względu na to, że test ten był bardzo podobny do poprzedniego wyniki również były podobne:

- **on_track** - uzyskane wyniki zebrane zostały w tabeli 5.3. Przedstawiona została suma wszystkich odchyłeń od zera dla sześciu składowych wektora pomiaru siły.

Średnie odchylenie podczas pomiaru pojedynczej wielkości np. siły wzdłuż osi x wynosi $0.1512N$ co jest wielkością małą, mieszczącą się w przedziale szumów pomiarowych uzyskiwanych podczas standardowych pomiarów. Oznacza to, że wyznaczony model jest akceptowalny. Tak niskie odchylenia od zera pokazują dlaczego w pierwszym przeprowadzonym teście manipulatora ten praktycznie nie „pływał”.

	suma odchyłeń
pomiar 1	9.884948535000003
pomiar 2	8.975707633259999
pomiar 3	9.733124456499997
pomiar 4	8.855968804999998
pomiar 5	7.904346799
suma wszystkich odchyłeń	45.35409622876
średnia suma odchyłeń	9.070819245752

Tablica 5.3: Test modelu

- **postument** - uzyskane wyniki zebrane zostały w tabeli 5.4. Przedstawiona została suma wszystkich odchyłeń od zera dla sześciu składowych wektora pomiaru siły.

	suma odchyłeń
pomiar 1	12.548754350999998
pomiar 2	14.519705149999998
pomiar 3	13.236789795999998
pomiar 4	13.644629844
pomiar 5	13.4655101794
suma wszystkich odchyłeń	67.41538932039997
średnia suma odchyłeń	13.483077864079993

Tablica 5.4: Test modelu

W tym przypadku analizując zamieszczone dane wyraźnie widać dlaczego w poprzednim eksperymencie manipulator miał tendencję do „płynięcia”. Sumacyjne odchylenia od zera są tu większe. Średnie odchylenie dla pojedynczej osi też jest większe, wynosi $0.2247N$. Obserwacja bardziej szczegółowych danych, pojedynczych pomiarów pokazała, że przy obrotach manipulatora na niektórych osiach odkładają się znaczne siły.

5.4 Zmiana obciążenia narzędzia, a jakość wyznaczenia siły skorygowanej

Pierwszym krokiem było ponowne wyznaczenie parametrów modelu środka ciężkości bez dodatkowego obciążenia przy pomocy opracowanej procedury. Parametry modelu, które w wyniku tego otrzymaliśmy przedstawione zostały w tabeli 5.5.

	waga	przesunięcie x	przesunięcie y	przesunięcie z
model:	13.4817	-0.00111373	-0.000537012	0.136934

Tablica 5.5: Model środka ciężkości bez dodatkowego obciążenia

Następnie mogliśmy przejść do uruchomienia procedury testowej. Składała się ona z dziesięciu kroków (ruchów do pozycji, gdzie wykonywane były pomiary). Taka seria pomiarów powtórzona została pięciokrotnie by uśrednić wyniki i wyeliminować przypadkowe wskazania. W tabelach z wynikami umieszczone dane mają następującą interpretację:

- pomiar n , $n=1..5$ - gdzie n oznacza numer powtórzonej próby, jest to suma odchyłeń dla wszystkich 10 pozycji manipulatora,
- suma wszystkich odchyłeń - jest to suma po wszystkich pięciu pomiarach,
- średnia suma odchyłeń - jest to uśredniona wartość dla pięciu prób pomiarów.

Przy pierwszym uruchomieniu procedury testowej manipulator wystartował bez żadnego dodatkowego obciążenia narzędzia. Miał to być pomiar wyjściowy, który pomoże nam odnieść się do kolejnych wyników. Wyniki tej fazy zebrane zostały w tabeli 5.6. W tym też momencie wyznaczone zostały odpowiednie referencyjne pomiary z matematycznego modelu transformacji sił.

	suma odchyłeń
pomiar 1	8.159744372
pomiar 2	8.914089437999998
pomiar 3	7.776358124000001
pomiar 4	9.006242749
pomiar 5	8.175924528400001
suma wszystkich odchyłeń	42.032359211400006
średnia suma odchyłeń	8.406471842280002

Tablica 5.6: Test modelu bez dodatkowych przedmiotów

5.4.1 Dodatkowe obciążenie nie uwzględnione w modelu środka ciężkości

Następnym krokiem badań było umieszczenie w chwytaku przedmiotu. Użyte zostały dwa różniące się wagą i kształtem obiekty. Pierwszym, lżejszym była kostka Rubika, a drugim cięższym był owalny odważnik o wadze 250g. Kostka Rubika była o tyle wdzięcznym obiektem, że chwytak został przystosowany do łapania takich przedmiotów jak kostka. Jednym z reprezentatywnych zadań wykonywanych w laboratorium przez parę robotów IRp-6 jest właśnie układanie kostki Rubika. Natomiast odważnik dla bezpieczeństwa pomiaru (by się nie wysliznął) należało dodatkowo przymocować taśmą. Dla takiego układu po raz kolejny uruchomiona została opisana procedura testowa, bez zmiany modelu środka ciężkości narzędzia, czyli dla parametrów wyznaczonych dla nieobciążonego chwytaka. Wyniki tych pomiarów zawarte zostały w tabeli 5.7. Ta sama czynność powtórzona została w modelu symulacyjnym. Z dokonanych pomiarów wynikało, że ciężar kostki wynosił $0.8445N$, tak więc o taką wartość zaburzony został ten model (zmieniony został ciężar narzędzia), uzyskane wyniki zawarte zostały w tabeli 5.8.

Wyniki umieszczone w tabeli 5.8 pokazują, że odchylenia jakie powinniśmy otrzymać powinny być rzędu $1N$ dla odczytów sił, natomiast dla momentów sił są one bardzo małe, pomijalne. Analizując odpowiednie wyniki otrzymana dla przypadku rzeczywistego widać, że jest tak w istocie.

Jak już wcześniej zostało wspomniane kolejnym przedmiotem jaki umieszczony został w chwytaku był odważnik 250g ($2.4516625N$). Był to przedmiot znacznie cięższy od kostki. Dla takiego układu po raz kolejny uruchomiliśmy procedurę testową. Wyniki tego pomiaru zebrane zostały w tabeli 5.9. To samo zostało uczynione dla modelu symulacyjnego (tabela 5.10).

	suma odchyłeń nowy z kostką
pomiar 1	13.307283783
pomiar 2	14.916945676999998
pomiar 3	14.699340997999991
pomiar 4	13.730868850000004
pomiar 5	13.865710860499998
suma wszystkich odchyłeń	70.52015016850001
średnia suma odchyłeń	14.104030033700003

Tablica 5.7: Test modelu z kostką

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	1.689
pozycja 3	-0.8445	0	0.8445
pozycja 4	-0.8445	0	0.8445
pozycja 5	-0.8445	0	0.8445
pozycja 6	0.8445	0	0.8445
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	-0.000579039907000001	0.001223552813	0
pozycja 3	-0.000289519953500001	-0.1160859690935	-0.000289519953500001
pozycja 4	-0.000289519953500001	-0.1160859690935	-0.000289519953500001
pozycja 5	-0.000289519953500001	-0.1160859690935	-0.000289519953500001
pozycja 6	-0.000289519953500001	0.1173095219065	0.000289519953500001
suma	8.914686181535		

Tablica 5.8: Model transformacji sił z kostka

	suma odchyłeń z kostką
pomiar 1	72.44279679
pomiar 2	72.18350018
pomiar 3	71.20709469509998
pomiar 4	71.4967484042
pomiar 5	72.36928322699998
suma wszystkich odchyłeń	359.6994232962999
średnia suma odchyłeń	71.93988465925999

Tablica 5.9: Test modelu z odważnikiem

Dobrze widać, że wraz ze wzrostem ciężaru znacząco wzrastają odchylenia. Na modelu symulacyjnym odchylenia te były rzędu $2.5N$ co potwierdziło się w przypadku rzeczywistym.

5.4.2 Dodatkowe obciążenie uwzględnione w modelu środka ciężkości

Kolejnym elementem który warto było przetestować było wyznaczenie modelu środka ciężkości narzędzia z przedmiotem już umieszczonym w chwytaku i przeprowadzenie testów dla takiego układu. Miało to dać nam odpowiedź na zasadnicze pytanie, którym jest przydatność proponowanej procedury. W założeniu cała procedura ma działać właśnie tak, że robot chwytka jakiś przedmiot, trzymając go wykonuje procedurę automatycznego wyznaczania modelu środka ciężkości, a system ustawia nowo

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	4.903325
pozycja 3	-2.4516625	0	2.4516625
pozycja 4	-2.4516625	0	2.4516625
pozycja 5	-2.4516625	0	2.4516625
pozycja 6	2.4516625	0	2.4516625
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	-0.001682610894925	0.003494508783075	0
pozycja 3	-0.0008413054474625	-0.337023383870963	-0.0008413054474625
pozycja 4	-0.0008413054474625	-0.337023383870963	-0.0008413054474625
pozycja 5	-0.0008413054474625	-0.337023383870963	-0.0008413054474625
pozycja 6	-0.0008413054474625	0.340517892654038	0.0008413054474625
suma	25.8801206075246		

Tablica 5.10: Model transformacji sił z odważnikiem 250g

wyznaczone parametry tego modelu. Następnie może już wykonywać swoje zadanie korzystając ze zwiększonej precyzji sterowania pozycyjno-siłowego. Tak, więc aby przekonać się co do praktycznej strony procedury najpierw umieściliśmy w chwytaku kostkę, a następnie wyznaczyliśmy model środka ciężkości. Wyznaczony model pokazany został w tabeli 5.11. Jak widać różni się on od poprzedniego, jak można było się spodziewać waga narzędzia jest większa o około 1N (czyli ciężar umieszczonej tam kostki). Minimalnej zmianie uległy również przesunięcia dla każdej z osi.

	waga	przesunięcie x	przesunięcie y	przesunięcie z
model:	14.3514	-0.0017411	-0.000581507	0.140876

Tablica 5.11: Model środka ciężkości z kostką umieszczoną w chwytaku

Po wyznaczeniu i ustawieniu nowego modelu uruchomiona została procedury testowa. Uzyskane wyniki zamieszczone zostały w tabeli 5.12.

	suma odchyień z kostką
pomiar 1	9.722130326000002
pomiar 2	9.597800706
pomiar 3	9.351541698
pomiar 4	9.605020997999999
pomiar 5	9.396272918
suma wszystkich odchyień	47.67276664599997
średnia suma odchyień	9.534553329199994

Tablica 5.12: Test modelu z kostką

Przyglądając się uzyskanym wynikom możemy dostrzec wyższość automatycznej procedury wyznaczenia środka ciężkości narzędzia nad parametrami wpisanymi na stałe do pliku konfiguracyjnego. Jest nią to, że możemy uruchomić ją każdorazowo gdy manipulator złapie inny pod względem kształtu i

5.4. ZMIANA OBCIĄŻENIA NARZĘDZIA, A JAKOŚĆ WYZNACZENIA SIŁY SKORYGOWANEJ³³

masy obiekt. Daje to sporą elastyczność przy sterowaniu, gdy wiemy, że manipulator będzie chwycił różne przedmioty. Poprawia się też jakość wyznaczania siły skorygowanej a więc i sterowania pozycyjno-siłowego.

Rozdział 6

Przyczyny błędnych wartości skorygowanej siły uogólnionej

Wyznaczanie modelu środka ciężkości oraz testowanie go opisane w rozdziale 5 pokazały, że niestety występują znaczne problemy z odczytami z czujników, które były szczególnie widoczne w robocie **postument**. Kolejne eksperymenty opisane w tym rozdziale miały na celu znalezienie przyczyny takiej sytuacji.

Założyliśmy na wstępie, że źródło problemów może tkwić w każdym z modeli, które odpowiedzialne są za opis robota. Analizowane modele to:

- model kinematyki ${}^0_W T$,
- położenie czujnika względem nadgarstka ${}^W_S T$,
- położenie środka ciężkości względem nadgarstka ${}^W_G P$ i ciężar narzędzia,
- parametry kalibracyjne opisujące model czujnika.

Badania trzech pierwszych modeli opisane w tym rozdziale doprowadziły do kilku wniosków. Wszystkie kolejno przeprowadzane testy wskazywały na to, że rozpatrywane indywidualnie potencjalne niedokładności tych modeli, w granicach, w których mogą mieć miejsce, nie wpływają istotnie na jakość wyznaczonej siły skorygowanej. Oczywiście jest tak, że błędy w parametrach modeli pogarszały uzyskiwane wyniki. Jednakże wszystko wskazywało na to, że żeby niedokładności wyników były aż tak duże jak uzyskiwaliśmy, modele te musiałyby być dość poważnie zaburzone. Istniała jeszcze możliwość, że błędy trzech pierwszych modeli sumują się i generują istotne błędy wyznaczonej siły skorygowanej. Ostatecznie jednak doszliśmy do wniosku, że to błędy w kalibracji czujnika są główną przyczyną złych odczytów sił.

Na wstępie chciałem zaznaczyć, że przeprowadzone eksperymenty miały na celu wskazanie drogi poszukiwania przyczyn błędnych odczytów z czujnika siły. Obrane metody nie zawsze były metodami bardzo dokładnymi, miały bardziej poglądowy charakter. Dzięki nim mogliśmy jednak zorientować się czy niedokładności w analizowanych modelach mogą mieć znaczący wpływ na odczyty sił z czujnika,

czy raczej nawet poważniejsze ich zaburzenia nie wpływają w takim stopniu na odczyty jak wskazują osiągnięte błędy wyznaczonej siły skorygowanej.

6.1 Model kinematyki ${}^0_W T$

Model kinematyki na podstawie położenia członów manipulatora określa położenie nadgarstka manipulatora względem układu bazowego którego oś pionowa z pokrywa się z kierunkiem działania siły grawitacji. W celu wykluczenia istotnego błędu tego modelu, z punktu widzenia wyznaczania siły skorygowanej, przeprowadzony został bardzo prosty eksperyment. Najpierw przy pomocy linki oraz odważnika przymocowanego do niej wyznaczony został pion. Następnie linka podwieszona została pod sufitem i przymocowana przy pomocy ciężarka do podłogi. Inna linka rozpięta została na chwytaku. Gdy wszystko było już przygotowane do przeprowadzenia eksperymentu zbliżyliśmy się manipulatorem do linki wyznaczającej pion tak by linka na chwytaku prawie stykała się z nią. Następnie przy pomocy tzw. ruchów ręcznych przemieszczaliśmy końcówkę manipulatora wzdłuż osi z , która to w założeniu miała pokrywać się z linką wyznaczającą pion. To, na co należało zwrócić szczególną uwagę było to, na jaką odległość chwytak oddali się od linki. Pokazałoby to na ile dokładnie oś pionowa modelu kinematyki pokrywa się z kierunkiem siły grawitacji. Dystans na jakim sprawdzaliśmy niedokładność modelu kinematyki (na którym poruszaliśmy się wzdłuż rozpiętej linki) wynosił 0.5m. Wyniki eksperymentu przedstawione zostały w tabeli 6.1.

robot	odległość na jaką chwytak oddalił się od linki
On_track	0.3cm
Postument	1.3cm

Tablica 6.1: Wynik testu modelu kinematyki ${}^0_W T$

Zamieszczone wyniki pokazują, że model kinematyki badany dla osi z w przypadku robota **postument** jest gorszy, a odchylenie osi wynosi około 1 stopień. Jednakże przeprowadzone później eksperymenty dotyczące położenia czujnika względem nadgarstka pokazały, że takie odchylenie nie generuje istotnych błędów.

6.2 Położenie czujnika względem nadgarstka ${}^W_S T$

W kolejnej fazie przeprowadzone zostały badania mające wskazać jak zaburzenia modelu położenia czujnika względem nadgarstka ${}^W_S T$ wpływają na odczyty siły skorygowanej. Omawiany model określony jest przez sześć składowych. Są to trzy przesunięcia, oraz trzy obroty dla każdej z osi układu. Wartości ich można łatwo zmieniać dokonując zmian w pliku konfiguracyjnym 6.1. Możliwość ta została wprowadzona na potrzeby realizacji tej pracy, uprzednio parametry omawianego modelu wpisane były na stałe w kodzie źródłowym aplikacji.

Listing 6.1: plik konfiguracyjny

```
1 sensor_in_wrist=0.0 0.0 0.09 0.0 0.0 -1.571
```


Eksperymenty polegały na niewielkich zmianach parametrów omawianego modelu względem parametrów wyjściowych i obserwacji zmian odczytu sił w opisywanym już eksperymencie polegającym na realizacji trajektorii i odczytywaniu siły skorygowanej. Testy te pokazały, że drobne zmiany orientacji czujnika względem nadgarstka mają minimalny wpływ na odczyt z czujnika. Były one niewspółmierne do różnic jakie osiągnęliśmy dla pomiarów w 6.3, gdzie wynosiły one około 6%. Sprawdzaliśmy tylko niewielkie zmiany orientacji, ponieważ wyjściowe położenie czujnika względem nadgarstka jest generalnie poprawne, a prawdopodobne niedokładności niewielkie. W dalszych eksperymentach zaburzano nie tylko orientację czujnika, ale również jego położenie. W celu lepszej interpretacji uzyskanych wyników w dalszej części posłużyliśmy się też opisanym w rozdziale 4 modelem symulacyjnym transformacji sił.

6.2.1 Wyjściowe parametry modelu

Uzyskane wyniki dla przypadku bez zaburzeń dla robota `on_track` mają charakter referencyjny dla dalszych eksperymentów (tabela 6.2). Przedstawiona została suma wszystkich odchyłeń od zera dla sześciu składowych wektora pomiaru siły. W tabelach z wynikami umieszczone dane mają następującą interpretację:

- pomiar n , $n=1..5$ - gdzie n oznacza numer powtórzonej próby, jest to suma odchyłeń dla wszystkich 10 pozycji manipulatora,
- suma wszystkich odchyłeń - jest to suma po wszystkich pięciu pomiarach,
- średnia suma odchyłeń - jest to uśredniona wartość dla pięciu prób pomiarów,

	suma odchyłeń
pomiar 1	9.884948535000003
pomiar 2	8.975707633259999
pomiar 3	9.733124456499997
pomiar 4	8.855968804999998
pomiar 5	7.904346799
suma wszystkich odchyłeń	45.35409622876
średnia suma odchyłeń	9.070819245752

Tablica 6.2: Test modelu bez zaburzeń

6.2.2 Przesunięcie w osi x

Przesunięcie w osi x o 1cm listing 6.2 oraz o 5cm listing 6.3.

Listing 6.2: plik konfiguracyjny, 1cm

```
1 sensor_in_wrist=0.01 0.0 0.09 0.0 0.0 -1.571
```

Listing 6.3: plik konfiguracyjny, 5cm

```
1 sensor_in_wrist=0.05 0.0 0.09 0.0 0.0 -1.571
```

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	0
pozycja 3	0	0	0
pozycja 4	0	0	0
pozycja 5	0	0	0
pozycja 6	0	0	0
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0.267970255734	0
pozycja 3	0	0.133977858867	0
pozycja 4	0	0.133977858867	0
pozycja 5	0	0.133977858867	0
pozycja 6	0	0.133977858867	0

Tablica 6.3: Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi x o 1cm

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	0
pozycja 3	0	0	0
pozycja 4	0	0	0
pozycja 5	0	0	0
pozycja 6	0	0	0
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	1.339730255734	0
pozycja 3	0	0.669857858867	0
pozycja 4	0	0.669857858867	0
pozycja 5	0	0.669857858867	0
pozycja 6	0	0.669857858867	0

Tablica 6.4: Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi x o 5cm

Wyniki uzyskane przy wykorzystaniu stworzonego modelu zawarte zostały w tabelach 6.3 oraz 6.4

Odczytując dane z tabeli 6.3 oraz 6.4 wyraźnie możemy dostrzec, że przy zaburzeniach modelu w osi x pojawia się niezerowy moment w osi y , im większe przesunięcie tym odchyłki te są większe. Jeżeli zaś chodzi o sumy odchyłek od zera dla uzyskanych wyników to wynoszą one odpowiednio

- przesunięcie 1cm - 0.803896229201999N
- przesunięcie 5cm - 4.019176229202N

Widać, że odchyłki znacznie wzrosły przy wzroście przesunięcia. Wzrost wyniósł 3.21528N.

Wyniki uzyskane dla rzeczywistego czujnika zawarte zostały w tabeli 6.5

Warto w tym przypadku przeprowadzić analizę średnich sum odchyłek, a dokładniej obliczyć ich różnicę. Wynosi ona 3.99915N, dla modelu symulacyjnego wynosiła natomiast 3.21528N. W prowadzonej analizie trzeba jeszcze uwzględnić to, że w przypadku rzeczywistym potrafią występować znaczne szумы. W związku z tym widać, że manipulator po zaburzeniach zachował się zgodnie z tym

	1cm	5cm
	suma odchyłeń	
pomiar 1	9.268974039000001	14.785165035999992
pomiar 2	10.768212696999996	13.788227487
pomiar 3	10.169003601000002	13.630264049999997
suma wszystkich odchyłeń	30.206190337000013	42.203656572999998
średnia suma odchyłeń	10.068730112333338	14.067885524333327

Tablica 6.5: Test zaburzonego modelu, przesunięcie w osi x o 1 i 5cm

jak tego oczekiwaliśmy, jak sugerował model. Przyjrzenie się bardziej szczegółowym wynikom wskazało też wzrost odchyłeń na osi y . widoczny jednak tylko dla przypadku przesunięcia o 5cm, ponieważ dla przesunięcia o 1cm oczekiwane wzrosty te są tak małe, że gubione były w szumie pomiarowym.

6.2.3 Przesunięcie w osi y

Przesunięcie w osi y o 1cm listing 6.4 oraz o 5cm listing 6.5.

Listing 6.4: plik konfiguracyjny, 1cm

```
1 sensor_in_wrist=0.0 0.01 0.09 0.0 0.0 -1.571
```

Listing 6.5: plik konfiguracyjny, 5cm

```
1 sensor_in_wrist=0.0 0.05 0.09 0.0 0.0 -1.571
```

Wyniki uzyskane przy wykorzystaniu stworzonego modelu zawarte zostały w tabelach 6.6 oraz 6.7

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	0
pozycja 3	0	0	0
pozycja 4	0	0	0
pozycja 5	0	0	0
pozycja 6	0	0	0
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	-0.267939157226	0	0
pozycja 3	-0.133969578613	0	-0.133969578613
pozycja 4	-0.133969578613	0	-0.133969578613
pozycja 5	-0.133969578613	0	-0.133969578613
pozycja 6	-0.133969578613	0	0.133969578613

Tablica 6.6: Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi y o 1cm

Odczytując dane z tabeli 6.6 oraz 6.7 wyraźnie możemy dostrzec, że przy zaburzeniach modelu w osi y pojawia się niezerowy moment w osi x oraz z , zwiększa się ze wzrostem przesunięcia. Jeżeli zaś chodzi o sumy odchyłek od zera dla uzyskanych wyników to wynoszą one odpowiednio

- przesunięcie 1cm - 1.33969578613N

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	0
pozycja 3	0	0	0
pozycja 4	0	0	0
pozycja 5	0	0	0
pozycja 6	0	0	0
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	-1.339699157226	0	0
pozycja 3	-0.669849578613	0	-0.669849578613
pozycja 4	-0.669849578613	0	-0.669849578613
pozycja 5	-0.669849578613	0	-0.669849578613
pozycja 6	-0.669849578613	0	0.669849578613

Tablica 6.7: Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi y o 5cm

- przesunięcie 5cm - 6.69849578613N

Widać, że odchyłki znacznie wzrosły przy wzroście przesunięcia. Wzrost wyniósł 5.3588N.

Wyniki uzyskane dla rzeczywistego czujnika zawarte zostały w tabeli 6.8

	1cm	5cm
	suma odchyłeń	
pomiar 1	9.252707023	13.370953086999995
pomiar 2	9.653626856999999	13.038563636999998
pomiar 3	9.468596429000002	12.961373907
suma wszystkich odchyłeń	28.374930308999986	39.370890631000016
średnia suma odchyłeń	9.458310102999995	13.123630210333339

Tablica 6.8: Test zaburzonego modelu, przesunięcie w osi y o 1 i 5cm

W tym przypadku też warto przeprowadzić analizę średnich sum odchyłeń, obliczyć ich różnicę. Wynosi ona 3.66532N, dla modelu symulacyjnego wynosiła natomiast 5.3588N. W tym przypadku uzyskane różnice bardziej się już różnią. Wynika to z tego, że dla przesunięć w osi y mamy do czynienia ze wzrostem odchyłeń dla dwóch osi. Szumy oraz drobne różnice wynikające z niedokładności modeli sprawiają, że w ostatecznym wyniku średnich odchyłeń sumuje nam się większa ilość czynników wpływających na błędy.

6.2.4 Przesunięcie w osi z

Przesunięcie w osi z o 1cm listing 6.6 oraz o 5cm listing 6.7.

Listing 6.6: plik konfiguracyjny, 1cm

```
1 sensor_in_wrist=0.0 0.0 0.08 0.0 0.0 -1.571
```

Listing 6.7: plik konfiguracyjny, 5cm

```
1 sensor_in_wrist=0.0 0.0 0.04 0.0 0.0 -1.571
```

Wyniki uzyskane przy wykorzystaniu stworzonego modelu zawarte zostały w tabelach 6.9 oraz 6.10

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	0
pozycja 3	0	0	0
pozycja 4	0	0	0
pozycja 5	0	0	0
pozycja 6	0	0	0
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	0
pozycja 3	0	-0.133962141133	0
pozycja 4	0	-0.133962141133	0
pozycja 5	0	-0.133962141133	0
pozycja 6	0	0.133992396867	0

Tablica 6.9: Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi z o 1cm

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	0
pozycja 3	0	0	0
pozycja 4	0	0	0
pozycja 5	0	0	0
pozycja 6	0	0	0
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	0
pozycja 3	0	-0.669842141133	0
pozycja 4	0	-0.669842141133	0
pozycja 5	0	-0.669842141133	0
pozycja 6	0	0.669872396867	0

Tablica 6.10: Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi z o 5cm

Odczytując dane z tabeli 6.9 oraz 6.10 możemy dostrzec, że przy zaburzeniach modelu w osi z pojawia się niezerowy moment w osi y , wzrasta z przesunięciem. Jeżeli zaś chodzi o sumy odchyłek od zera dla uzyskanych wyników to wynoszą one odpowiednio

- przesunięcie 1cm - 0.535878820266N
- przesunięcie 5cm - 2.679398820266N

W tym przypadku odchyłki nie wzrosły mniej niż w dwóch poprzednich przypadkach. Wzrost wyniósł 2.14352N.

Wyniki uzyskane dla rzeczywistego czujnika zawarte zostały w tabeli 6.11

W tym przypadku również przeprowadzona została analiza różnic średnich sum odchyłek. Wynosi ona 3.24587N, dla modelu symulacyjnego wynosiła natomiast 2.14352N. Tutaj tak jak w poprzednich

	1cm	5cm
	suma odchyłeń	
pomiar 1	10.051507868999998	13.270798082899995
pomiar 2	10.271022782599998	13.239428901
pomiar 3	9.991783147000001	13.541704745000004
suma wszystkich odchyłeń	30.314313798599997	40.051931728900016
średnia suma odchyłeń	10.104771266199998	13.35064390963334

Tablica 6.11: Test zaburzonego modelu, przesunięcie w osi z o 1 i 5cm

przypadkach trzeba jeszcze uwzględnić to, że w przypadku rzeczywistym potrafią występować znaczne szумы oraz niedokładności innych modeli wykorzystywanych w sterowniku. Widać jednak, że manipulator po zaburzeniach zachował się zgodnie z tym jak tego oczekiwaliśmy, jak sugerował model. Przjrzenie się bardziej szczegółowym wynikom wskazało też wzrost odchyłeń na osi y . Widoczny jest on jednak tylko dla przypadku przesunięcia o 5cm, ponieważ dla przesunięcia o 1cm oczekiwane wzrosty są tak małe, że gubione były w szumie pomiarowym.

6.2.5 Równoczesne przesunięcia w osiach x , y , z

Przesunięcie w osi x , y , z o 5cm listing 6.8.

Listing 6.8: plik konfiguracyjny, 1cm

```
1 sensor_in_wrist=0.05 0.05 0.14 0.0 0.0 -1.571
```

Wyniki uzyskane przy wykorzystaniu stworzonego modelu zawarte są w tabeli 6.12

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	0
pozycja 3	0	0	0
pozycja 4	0	0	0
pozycja 5	0	0	0
pozycja 6	0	0	0
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	-1.339699157226	1.339730255734	0
pozycja 3	-0.669849578613	1.339707858867	-0.669849578613
pozycja 4	-0.669849578613	1.339707858867	-0.669849578613
pozycja 5	-0.669849578613	1.339707858867	-0.669849578613
pozycja 6	-0.669849578613	0	0.669849578613

Tablica 6.12: Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi x , y oraz z o 5cm

Odczytując dane z tabeli 6.12 możemy dostrzec, że przy zaburzeniach modelu w osi x , y oraz z o 5cm pojawia się niezerowy moment w osi x , y oraz z . Jeżeli zaś chodzi o sumy odchyłek od zera dla uzyskanych wyników to wynoszą one $12.057349618465N$.

Wyniki uzyskane dla rzeczywistego czujnika zawarte zostały w tabeli 6.13

x, y, z 5cm	
	suma odchyłeń
pomiar 1	18.574297526000002
pomiar 2	17.805654128000004
pomiar 3	17.588158103000001
suma wszystkich odchyłeń	53.968109757000015
średnia suma odchyłeń	17.989369919000005

Tablica 6.13: Test zaburzonego modelu, przesunięcie w osi x, y oraz z o 5cm

Analizując wyniki uzyskane dla stworzonego modelu transformacji sił wyraźnie widać, że przesunięcia czujnika niezależnie czy to w osi x, y lub z wpływają jedynie na wzrost momentów sił, a nie wpływają na wzrost odczytów sił. Wraz ze wzrostem przesunięć zwiększają się wartości odchyłeń odczytów sił. Chcąc jakoś odnieść te wyniki do tych uzyskanych przy wykorzystaniu rzeczywistego manipulatora natrafiamy na pewien problem. Otóż dla przesunięć czujnika rzędu 1cm szumy, niedokładności występujące podczas odczytów sprawiały, że niemożliwym było stwierdzenie zgodności ze stworzonym modelem. Ewentualne wzrosty jakich oczekiwaliśmy były na tyle niewielkie (rzędu $0.1N$), że niemożliwym było stwierdzenie czy rzeczywiście wystąpiły. Klarowniejszą sytuację mieliśmy dla przesunięć o 5cm bo w tym przypadku mieliśmy obserwować wzrosty momentów rzędu $0.6N$. Te już dało się zaobserwować. Pozwoliło nam to stwierdzić, że robot zachowuje się zgodnie z oczekiwaniami, tzn. tak jak wynika z przyjętego modelu transformacji sił.

6.2.6 Obrót w osi x

Kolejne wyniki oraz zaburzenia polegające na obrotach czujnika przy jakich je uzyskiwaliśmy, przedstawione zostały poniżej.

Obrót w osi x o 5° listing 6.9.

Listing 6.9: plik konfiguracyjny, 5°

```
1 sensor_in_wrist=0.0 0.0 0.09 0.08726646 0.0 -1.571
```

Wyniki uzyskane przy wykorzystaniu stworzonego modelu zawarte są w tabeli 6.14

Odczytując dane z tabeli 6.14 możemy dostrzec, że przy zaburzeniach modelu obracając czujnik o kąt 5° w osi x pojawiają się odchyłki zarówno jeżeli chodzi o odczyty sił (x,y) jak i momenty (x,y) . Widać dobrze, że takie obrócenie czujnika szczególnie mocno wpływa na odczyt siły w osi y . Suma odchyłek od zera dla uzyskanych wyników wynosi $5.54797951650042N$.

Wyniki uzyskane dla rzeczywistego czujnika zawarte są w tabeli 6.15

6.2.7 Obrót w osi y

Obrót w osi y o 5° listing 6.10.

Listing 6.10: plik konfiguracyjny, 5°

```
1 sensor_in_wrist=0.0 0.0 0.09 0.0 0.08726646 -1.571
```

Wyniki uzyskane przy wykorzystaniu stworzonego modelu zawarte są w tabeli 6.16

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	0
pozycja 3	-0.05097962662939	1.16762545089451	0
pozycja 4	-0.05097962662939	1.16762545089451	0
pozycja 5	-0.05097962662939	1.16762545089451	0
pozycja 6	0.05097962662939	-1.16762545089451	0
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0.00161307748751167	0.000904008745235725	0
pozycja 3	-0.160531809649419	-0.00659944883541346	0
pozycja 4	-0.160531809649419	-0.00659944883541346	0
pozycja 5	-0.160531809649419	-0.00659944883541346	0
pozycja 6	0.162144887136931	0.00750345758064925	0

Tablica 6.14: Wyniki uzyskane dla obrócenia w osi x o 5°

5°	
	suma odchyień
pomiar 1	17.709297889000002
pomiar 2	17.882707025300004
pomiar 3	17.860990232000006
pomiar 4	17.766110627
pomiar 5	16.337594650999996
suma wszystkich odchyień	87.5567004243
średnia suma odchyień	17.511340084860002

Tablica 6.15: Test zaburzonego modelu, obrót w osi x o 5°

Odczytując dane z tabeli 6.16 możemy dostrzec, że przy zaburzeniach modelu w osi y polegających na obrocie czujnika o 5° pojawia się niezerowy moment w osi x , y , z oraz pojawiają się odczyty sił w osiach x i z . Szczególnie wyraźnie wzrastają odczyty sił. Suma odchyłek od zera dla uzyskanych wyników wynosi $12.4218407733254N$.

Wyniki uzyskane dla rzeczywistego czujnika zawarte są w tabeli 6.17

6.2.8 Obrót w osi z

Obrót w osi z o 5° listing 6.11, o 0.527331630670162° listing 6.12, oraz o -0.61858395959149° listing 6.13.

Listing 6.11: plik konfiguracyjny, 5°

```
1 sensor_in_wrist=0.0 0.0 0.09 0.0 0.0 -1.4835298
```

Listing 6.12: plik konfiguracyjny, 0.527331630670162°

```
1 sensor_in_wrist=0.0 0.0 0.09 0.0 0.0 -1.58
```

Listing 6.13: plik konfiguracyjny, -0.61858395959149°

```
1 sensor_in_wrist=0.0 0.0 0.09 0.0 0.0 -1.56
```


	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	-2.33525090178902	0	0.10195925325878
pozycja 3	-1.2186050775239	0	-1.11664582426512
pozycja 4	-1.2186050775239	0	-1.11664582426512
pozycja 5	-1.2186050775239	0	-1.11664582426512
pozycja 6	-1.11664582426512	0	1.2186050775239
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	-0.210142325427011	-0.000801832809452076
pozycja 3	0.000383833403990336	-0.109666598110151	-0.000417999405461741
pozycja 4	0.000383833403990336	-0.109666598110151	-0.000417999405461741
pozycja 5	0.000383833403990336	-0.109666598110151	-0.000417999405461741
pozycja 6	-0.000417999405461741	-0.100475727316861	-0.000383833403990336

Tablica 6.16: Wyniki uzyskane dla obrócenia w osi y o 5°

5°	
	suma odchyłeń
pomiar 1	16.809527749999997
pomiar 2	16.615634169000003
pomiar 3	16.800498296
pomiar 4	16.689902437
pomiar 5	16.480586489000004
suma wszystkich odchyłeń	83.396149141
średnia suma odchyłeń	16.6792298282

Tablica 6.17: Test zaburzonego modelu, obrót w osi y o 5° **Wyniki uzyskane przy wykorzystaniu stworzonego modelu zawarte są w tabeli 6.18**

Odczytując dane z tabeli 6.18 możemy dostrzec, że przy zaburzeniach modelu w osi z polegających na obrocie czujnika o 5° pojawiają się niezerowe momenty w osiach x , y oraz wzrosty odczytów sił na osiach x , y . Suma odchyłek od zera dla uzyskanych wyników wynosi $5.54797951650019N$.

W tym przypadku (tabela 6.19), gdy zaburzyliśmy model dużo mniejszym obrotem, obróciliśmy go wokół osi z o 0.527331630670162° zgodnie z oczekiwaniami uzyskaliśmy dużo mniejsze odchyłki. Suma odchyłek od zera dla uzyskanych wyników wynosi $0.563955112228553N$.

W tym przypadku (tabela 6.20), gdy zaburzyliśmy model innym dużo mniejszym obrotem, obróciliśmy go wokół osi z o -0.61858395959149° znowu zgodnie z oczekiwaniami uzyskaliśmy dużo mniejsze odchyłki. Suma odchyłek od zera dla uzyskanych wyników wynosi $0.661917521448826N$.

Wyniki uzyskane dla rzeczywistego czujnika zawarte są w tabeli 6.21

Warto zauważyć, że w przypadku obrotu wokół osi z o 0.527331630670162° uzyskane wyniki są lepsze od wyników uzyskanych dla modelu bez zaburzeń. Spośród dokonanych pomiarów był to jedyny taki zaobserwowany przypadek. Może to oznaczać, że można jeszcze trochę ulepszyć model położenia czujnika względem nadgarstka ${}^W_S T$ tak by zoptymalizować uzyskiwane odczyty, bo jak widać przeprowadzony eksperyment pokazał, że przy drobnych manipulacjach można osiągnąć lepsze rezultaty.

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	0
pozycja 3	-0.0509796266293847	1.16762545089446	0
pozycja 4	-0.0509796266293847	1.16762545089446	0
pozycja 5	-0.0509796266293847	1.16762545089446	0
pozycja 6	0.0509796266293847	-1.16762545089446	0
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0.00161307748751161	0.000904008745235687	0
pozycja 3	-0.160531809649413	-0.00659944883541301	0
pozycja 4	-0.160531809649413	-0.00659944883541301	0
pozycja 5	-0.160531809649413	-0.00659944883541301	0
pozycja 6	0.162144887136925	0.00750345758064859	0

Tablica 6.18: Wyniki uzyskane dla obrócenia w osi z o 5°

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	0
pozycja 3	-0.000567409856378376	-0.123299869172225	0
pozycja 4	-0.000567409856378376	-0.123299869172225	0
pozycja 5	-0.000567409856378376	-0.123299869172225	0
pozycja 6	0.000567409856378376	0.123299869172225	0
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	-0.00017349384599207	0	0
pozycja 3	0.0169503921990585	-0.000112479875306869	0
pozycja 4	0.0169503921990585	-0.000112479875306869	0
pozycja 5	0.0169503921990585	-0.000112479875306869	0
pozycja 6	-0.0171238860450506	0	0

Tablica 6.19: Wyniki uzyskane dla obrócenia w osi z o 0.527331630670162°

Na podstawie uzyskanych wyników widać, że zaburzenia modelu polegające na wprowadzeniu zmodyfikowanego kąta obrotu czujnika, w przeciwieństwie do zaburzeń jego przesunięcia, wpływają zarówno na odchylenia w odczytach momentów sił jak i samych sił.

Analizując powyższe wyniki, zarówno te związane z przesunięciami czujnika jak i te z jego obrotem widzimy, że obiekt rzeczywisty zachowuje się zgodnie z naszymi oczekiwaniami i symulacją. Aby uzyskać zaburzenia w odczytach sił rzędu 1N, musieliśmy istotnie zaburzyć omawiany model. Takie zaburzenia odpowiadają np. obróceniu czujnika o 5° czy przesunięciu go o 5cm . Są to wielkości dość duże i raczej jest to niemożliwe, żeby w rzeczywistości czujnik był aż tak istotnie przesunięty bądź obrócony względem parametrów wyjściowych.

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	0
pozycja 3	-0.000780774079141011	0.144635580229608	0
pozycja 4	-0.000780774079141011	0.144635580229608	0
pozycja 5	-0.000780774079141011	0.144635580229608	0
pozycja 6	0.000780774079141011	-0.144635580229608	0
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0.000204353212516942	0.000130681498589698	0
pozycja 3	-0.0198830554861532	0	0
pozycja 4	-0.0198830554861532	0	0
pozycja 5	-0.0198830554861532	0	0
pozycja 6	0.0200874086986702	0.000180494345592598	0

Tablica 6.20: Wyniki uzyskane dla obrócenia w osi z o -0.61858395959149°

6.3 Położenie środka ciężkości narzędzia względem nadgarstka ${}^W_G P$ i ciężar narzędzia

Model położenia środka ciężkości względem nadgarstka ${}^W_G P$ i ciężar narzędzia został zidentyfikowany oraz zweryfikowany już na samym początku prowadzonych prac. Opracowana procedura opisana w rozdziale 5 zapewnia nam poprawne wyznaczenie tego modelu. Już ona pokazała, że czujnik nie działa poprawnie. Wskazał na to jeden ciekawy eksperyment. Otóż automatyczna procedura wyznaczania modelu środka ciężkości modyfikowana była w taki sposób, że ciężar narzędzia mierzony był nie tylko wzdłuż osi z , ale również wzdłuż osi x oraz y . Wyniki okazały się na tyle zaskakujące, że ciężary tego samego narzędzia mierzony wzdłuż tych osi potrafił znacznie się różnić. Obrazują to wyniki zamieszczone w tabeli 6.22.

Jak można dostrzec różnice w pomiarach potrafią wynosić do 6%. Różnica pomiędzy minimalnym, a maksymalnym pomiarem wyniosła $0.8251N$. Przyjmując wielkość normalnego przyspieszenia ziemskiego $g_n = 9.80665 \frac{m}{s^2}$ oraz korzystając ze wzoru $F = m \cdot g_n$ otrzymujemy różnicę w pomiarach wynoszącą $84.13678473280886g$. Można zatem stwierdzić, że błędy pomiarów siły są całkiem spore.

Innym ciekawym eksperymentem przeprowadzonym na stworzonym modelu symulacyjnym transformacji sił był eksperyment polegający na zaburzeniach parametru wagi narzędzia. Była ona zmieniana o 5% (z $13.397N$ na $14.06685N$) i 10% (z $13.397N$ na $14.7367N$), otrzymane wyniki umieszczone zostały w poniższych tabelach 6.23 oraz 6.24

- Zaburzenie wagi narzędzia o 5% listing 6.14.

Listing 6.14: zaburzenie wagi narzędzia o 5%

```
1 przesunięcia:[-0.000706511 ; -0.000343329 ; 0.14508585], ciężar narzędzia: 14.06685
```

Otrzymane wyniki pokazują, że zaburzenia odczytu sił dla osi x oraz z są dość znaczne i wynoszą dokładnie tyle o ile zaburzyliśmy wagę. Są one jednak jeszcze troszkę mniejsze od tych

5°	
	suma odchyłeń
pomiar 1	15.909852826999996
pomiar 2	16.594881808500002
pomiar 3	17.076059036999997
pomiar 4	17.040489814000004
pomiar 5	16.63669652
suma wszystkich odchyłeń	83.25798000649995
średnia suma odchyłeń	16.65159600129999
0.527331630670162°	
	suma odchyłeń
pomiar 1	8.347941704
pomiar 2	8.873625506000002
pomiar 3	8.629583627
pomiar 4	8.918352338999998
pomiar 5	9.129299266999995
suma wszystkich odchyłeń	43.898802442999994
średnia suma odchyłeń	8.7797604886
-0.61858395959149°	
	suma odchyłeń
pomiar 1	9.031909650999998
pomiar 2	9.295510374
pomiar 3	9.804311509999998
pomiar 4	9.438262149999998
pomiar 5	10.331145217999998
suma wszystkich odchyłeń	47.90113890299998
średnia suma odchyłeń	9.580227780599996

Tablica 6.21: Test zaburzonego modelu

	z	x metoda 1	x metoda 2	x metoda 2 rev
pomiar 1:	13.2499	13.7	14.075	14.075
pomiar 2:	13.2	13.75	14.1	14.0501
średnio:	13.22495	13.725	14.06255	14.0875
	y metoda 1	y metoda 2	y metoda 2 rev	
pomiar 1:	13.775	13.5	13.45	
pomiar 2:	13.6	13.675	13.475	
średnio:	13.6875	13.5875	13.4625	

Tablica 6.22:

różnic jakie uzyskiwaliśmy dla pomiaru wagi. Suma odchyłeń od zera w tym przypadku wyniosła $7.07105610523651N$

- Zaburzenie wagi narzędzia o 10% listing 6.15.

Listing 6.15: zaburzenie wagi narzędzia o 10%

```
1 przesunięcia:[-0.000706511 ; -0.000343329 ; 0.138177], ciężar narzędzia = 14.7367
```

Zgodnie z oczekiwaniami zaburzenia odczytu sił dla osi x oraz z wzrosły jeszcze bardziej i wynoszą dokładnie tyle o ile zaburzyliśmy wagę. Są one troszkę większe od różnic jakie uzyskiwaliśmy dla

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	1.3397
pozycja 3	-0.66985	0	0.66985
pozycja 4	-0.66985	0	0.66985
pozycja 5	-0.66985	0	0.66985
pozycja 6	0.66985	0	0.66985
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	-0.000459115087300002	0.000976768520700003	0
pozycja 3	-0.000229557543650001	-0.09207674818965	-0.000229557543650001
pozycja 4	-0.000229557543650001	-0.09207674818965	-0.000229557543650001
pozycja 5	-0.000229557543650001	-0.09207674818965	-0.000229557543650001
pozycja 6	-0.000229557543650001	0.0930535167103499	0.000229557543650001

Tablica 6.23: Wyniki uzyskane dla zaburzenia wagi narzędzia o 5%

	F_x	F_y	F_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	0	0	2.6794
pozycja 3	-1.3397	0	1.3397
pozycja 4	-1.3397	0	1.3397
pozycja 5	-1.3397	0	1.3397
pozycja 6	1.3397	0	1.3397
	N_x	N_y	N_z
pozycja 1	0	0	0
pozycja 2	-0.000919072948600001	0.0019232813074	0
pozycja 3	-0.0004595364743	-0.1841613552463	-0.0004595364743
pozycja 4	-0.0004595364743	-0.1841613552463	-0.0004595364743
pozycja 5	-0.0004595364743	-0.1841613552463	-0.0004595364743
pozycja 6	-0.0004595364743	0.1860846365537	0.0004595364743

Tablica 6.24: Wyniki uzyskane dla zaburzenia wagi narzędzia o 10%

pomiaru wagi. Suma odchyłeń od zera w tym przypadku wyniosła 14.142087348343N.

Wniosek wynikający z tego eksperymentu jest taki, że dość poważne zaburzenie, zmiana tego modelu mogłaby sprawić, że uzyskujemy tak zakłamane odczyty jak miało to miejsce w eksperymencie. Model, a dokładniej waga narzędzia musiałaby zostać zaburzona o wartość z przedziału 5-10% co jest wielkością dość dużą i możemy wykluczyć taką ewentualność.

Wykonywane kolejno badania doprowadziły nas do wniosku, że największe niedokładności wpływające na błędne odczyty z czujnika muszą wynikać wprost z parametrów kalibracyjnych czujnika czyli de facto z samego czujnika. Przeprowadzone eksperymenty polegające na zaburzeniach poszczególnych modeli wskazały, że kolejne modele musiałyby być naprawdę mocno zmodyfikowane, żeby uzyskiwane wyniki były w rezultacie aż tak niedokładne.

6.4 Parametry kalibracyjne opisujące model czujnika

Do czujnika siły wraz z dokumentacją dołączony był bardzo ważny xml'owy plik konfiguracyjny. Parametry w nim zawarte wyznaczone zostały w procesie kalibracji czujnika. Dokonano tego po stronie producenta, w firmie ATI. Zawartość pliku konfiguracyjnego przedstawiona została na listingu 6.16.

Listing 6.16: ft6284.cal

```

1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2 <!-- NOTE: To ensure compatibility between your software and future F/T calibrations -->
3 <!-- (such as recalibrations of your transducer or future purchases), -->
4 <!-- ATI does not support parsing of this file. The only supported methods for -->
5 <!-- loading calibration data are the ATIDAQFT ActiveX component and the -->
6 <!-- ATI DAQ F/T C Library. -->
7 <FTSensor Serial="FT6284" BodyStyle="Gamma" Family="DAQ" NumGages="6" CalFileVersion="1.0">
8   <Calibration PartNumber="SI-65-5" CalDate="7/21/2005" ForceUnits="N" TorqueUnits="N-m"
9     DistUnits="m" OutputMode="Ground_Referenced_Differential" OutputRange="20" HWTempComp="True"
10    GainMultiplier="1" CableLossDetection="False" OutputBipolar="True">
11     <Axis Name="Fx" values="0.40709 0.27318 0.34868 33.58156 0.32609 33.54162" max="65"
12       scale="4.5511972116989"/>
13     <Axis Name="Fy" values="0.35472 38.22730 0.41173 19.49156 0.49550 19.15271" max="65"
14       scale="4.5511972116989"/>
15     <Axis Name="Fz" values="18.72635 0.59676 19.27843 0.56931 18.69352 0.67633" max="200"
16       scale="1.41244051397552"/>
17     <Axis Name="Tx" values="0.40836 0.95908 33.37957 1.38537 32.52522 0.51156" max="5"
18       scale="84.8843245576086"/>
19     <Axis Name="Ty" values="37.13715 1.02875 20.00474 0.27959 19.34135 1.42577" max="5"
20       scale="84.8843245576086"/>
21     <Axis Name="Tz" values="0.15775 18.16831 0.00133 18.78961 0.31895 18.38586" max="5"
22       scale="80.9472037525247"/>
23     <BasicTransform Dx="0" Dy="0" Dz="0.01343355078" Rx="0" Ry="0" Rz="0"/>
24   </Calibration>
25 </FTSensor>

```

Eksperyment mające na celu weryfikację tego modelu przebiegał w taki sposób, że przy użyciu czujnika siły ważyliśmy różne odważniki: 250g, 500g, 1kg, 2kg dokonując pomiaru dla każdej z osi x , y oraz z , a następnie sprawdzaliśmy jak uzyskane wyniki mają się do rzeczywistych ciężarów odważników.

Chcąc poprawić ten model staraliśmy się wpłynąć na niego poprzez zmianę współczynnika skalującego. Ustalenie tego jak wpłyniemy na zmianę tego współczynnika odbywało się w taki sposób, że uzyskany z pomiaru wynik dzieliśmy przez rzeczywisty ciężar odważnika i rezultat tej operacji mnożyliśmy przez współczynnik skali określony w parametrach zawartych w pliku 6.16. Uzyskany wynik wpisywany był jako nowy współczynnik skalujący. Z tak zmienionym współczynnikiem dokonywaliśmy ponownego pomiaru i sprawdzaliśmy czy wyniki rzeczywiście się poprawiły.

Analogiczne pomiary zastosowaliśmy do zweryfikowania współczynników skalujących określających momenty sił wokół wszystkich trzech osi, z tym że tym razem odważniki zamieszczone były na ramieniu o długości 1m.

Dla przypadku pomiaru sił nowy współczynnik wyznaczany był dla odważnika 1kg. Robiliśmy tak ponieważ dla takiego ciężaru szumy nie miały aż takiego wpływu na odczyty z czujnika, wszelkie zmiany były dużo lepiej widoczne.

Uzyskiwane ciężary poszczególnych odważników F_o powinny wynosić odpowiednio (dla $g_n = 9.80665 \frac{m}{s^2}$):

- 250g - 2.4516625N,

- 500g - 4.903325N,
- 1kg - 9.80665N,
- 2kg - 19.6133N.

Uzyskane wyniki zebrane zostały w poniższych tabelach:

6.4.1 Pomiar siły dokonany wzdłuż osi z, tabele: 6.25 oraz 6.26.

	F_x	F_y	F_z	N_x	N_y	N_z
0g:	-0.0602651	0.0526002	0.075227	0.0013495	-0.000653802	0.00118048
250g:	-0.0178708	-0.0528341	2.40432	0.0111936	0.0287487	0.00076646
500g:	-0.0628252	-0.121492	4.56497	0.0159742	-0.00459283	0.0041468
1kg:	0.0822859	-0.152622	9.31545	0.0419699	-0.0495986	-0.00126058
2kg:	0.131394	-0.232045	18.6672	0.104709	-0.143054	-0.00444344

Tablica 6.25: Pomiary dokonane wzdłuż osi z

	F_z	F_z^{+bias}	$ F_o - F_z^{+bias} $	%
250g:	2.40432	2.329093	0.1225695	4.99944425466393
500g:	4.56497	4.489743	0.413582	8.43472541591675
1kg:	9.31545	9.240223	0.566427	5.77594795368449
2kg:	18.6672	18.591973	1.021327	5.20731850326054

Tablica 6.26: Pomiary dokonane wzdłuż osi z

Jak widać po wynikach zamieszczonych w tabeli 6.26 różnice w przypadku pomiarów wzdłuż tej osi pomiędzy wynikami jakie powinniśmy osiągnąć, a tymi jakie uzyskaliśmy są dość znaczne. W zależności od badanego ciężaru wynoszą od około 5% do 8%. Trzeba też zaznaczyć, że wartości odkładające się na pozostałych osiach są nieznaczne. Należy zauważyć, że w tym przypadku jak i w kolejnych błąd bezwzględny wzrasta wraz z przykładanym ciężarem.

6.4.2 Pomiar siły dokonany wzdłuż osi x, tabele: 6.27 oraz 6.28.

	F_x	F_y	F_z	N_x	N_y	N_z
0g:	-0.0655678	0.0393862	-0.206683	-0.00529224	-0.00470478	0.000775985
250g:	2.41271	-0.108035	-0.391561	0.0124623	0.424256	0.00931047
500g:	4.79633	0.110201	-0.528361	-0.00161715	0.834524	0.00391912
1kg:	9.90611	0.748294	-0.747792	-0.0145077	1.6178	0.0488571
2kg:	19.3108	1.47768	-1.81408	-0.0308865	3.14704	0.0325397

Tablica 6.27: Pomiary dokonane wzdłuż osi x det

W przypadku pomiaru wzdłuż osi x wyniki zamieszczone w tabeli 6.28 pokazują, że tym razem różnice pomiędzy wynikami jakie powinniśmy osiągnąć, a tymi jakie uzyskaliśmy są dużo mniejsze. Można zatem stwierdzić, że pomiar wzdłuż tej osi okazał się o wiele dokładniejszy. Tym razem na innych osiach odłożyły się większe wartości niż miało to miejsce w przypadku pomiaru wzdłuż osi z,

	F_x	F_x^{+bias}	$ F_o - F_x^{+bias} $	%
250g:	2.41271	2.4782778	0.0266153	1.08560211693086
500g:	4.79633	4.8618978	0.0414272	0.84487974996558
1kg:	9.90611	9.9716778	0.1650278	1.68281523252079
2kg:	19.3108	19.3763678	0.2369322	1.20801802858265

Tablica 6.28: Pomiary dokonane wzdłuż osi x

wielkości te nie są jednak bardzo duże więc mogą równie dobrze wynikać z niedokładności metody pomiarowej.

6.4.3 Pomiar siły dokonany wzdłuż osi x obróconej o 180° , tabele: 6.29 oraz 6.30.

	F_x	F_y	F_z	N_x	N_y	N_z
0g:	0.068282	-0.0531144	-0.407449	0.00531261	0.00993223	-0.000347049
250g:	-2.41337	-0.359602	0.121162	0.0137362	-0.346871	0.015354
500g:	-4.80849	-0.366331	0.107172	-0.00356681	-0.813341	0.0027537
1kg:	-9.73448	-0.848294	0.940741	0.00457684	-1.69304	0.0357293
2kg:	-19.4917	-1.6838	1.62348	0.00145843	-3.43381	0.0331193

Tablica 6.29: Pomiary dokonane wzdłuż osi x obróconej o 180°

	F_x	F_x^{+bias}	$ F_o - F_x^{+bias} $	%
250g:	-2.41337	-2.481652	0.0299895	1.20844904926235
500g:	-4.80849	-4.876772	0.026553	0.54153049206406
1kg:	-9.73448	-9.802762	0.003888	0.03964656636058
2kg:	-19.4917	-19.559982	0.053318	0.27184614521779

Tablica 6.30: Pomiary dokonane wzdłuż osi x obróconej o 180°

W przypadku pomiaru wzdłuż osi x obróconej o 180° wyniki zamieszczone w tabeli 6.30 pokazują, że tym razem różnice pomiędzy wynikami jakie powinniśmy osiągnąć, a tymi jakie uzyskaliśmy są jeszcze mniejsze niż dla poprzedniego pomiaru wzdłuż osi x przed jej obróceniem.

6.4.4 Pomiar siły dokonany wzdłuż osi y , tabele: 6.31 oraz 6.32.

	F_x	F_y	F_z	N_x	N_y	N_z
0g:	-0.0418946	-0.0378069	-0.320513	-0.00278117	-0.00347447	-0.00336284
250g:	-0.193363	-2.42319	0.0322903	0.379961	-0.0148	-0.0251043
500g:	-0.0732565	-4.83445	0.0276152	0.767236	0.0149044	-0.0362751
1kg:	-0.193379	-9.25071	-0.128195	1.5329	0.0324302	-0.0554537
2kg:	-0.694608	-18.2025	-0.308412	3.0637	0.0128583	-0.257463

Tablica 6.31: Pomiary dokonane wzdłuż osi y

W przypadku pomiaru wzdłuż osi y wyniki zamieszczone w tabeli 6.32 są o tyle ciekawe, że różnice pomiędzy wynikami jakie powinniśmy osiągnąć, a tymi jakie uzyskaliśmy nie są tak równomiernie rozłożone jak miało to miejsce w przypadku poprzednich pomiarów. Tym razem dla ciężarów 250g i

	F_x	F_x^{+bias}	$ F_o - F_x^{+bias} $	%
250g:	-2.42319	-2.4650846	0.0134221	0.54746931928844
500g:	-4.83445	-4.8763446	0.0269804	0.55024702625259
1kg:	-9.25071	-9.2926046	0.5140454	5.24180428586724
2kg:	-18.2025	-18.2443946	1.3689054	6.97947515206518

Tablica 6.32: Pomiary dokonane wzdłuż osi y

500g uzyskiwaliśmy bardzo małe wartości błędów by dla 1kg i 2kg błąd ten wzrósł dość znacznie bo z 0.5% do około 5% – 6%. Może to wskazywać na pewną nieliniowość w zakresie pracy czujnika.

6.4.5 Pomiar momentu siły

Pomiar momentu siły dokonany wzdłuż osi z , tabele: 6.33 oraz 6.34

	F_x	F_y	F_z	N_x	N_y	N_z
0g:	0.0124239	0.0222883	-0.0384285	-0.00625994	-0.000632599	-0.00264223
250g:	-2.8763	1.29073	-0.15263	-0.317746	-0.494731	-2.40781
500g:	-6.80932	2.5313	0.163513	-0.664629	-1.12104	-4.72775

Tablica 6.33: Pomiary momentów wokół osi z

	F_x	F_x^{+bias}	$ F_o - F_x^{+bias} $	%
250g:	-2.40781	-2.41045223	0.04121027	1.68091121840792
500g:	-4.72775	-4.73039223	0.17293277	3.52684698648366

Tablica 6.34: Pomiary dokonane wzdłuż osi z

Pomiar momentu siły dokonany wzdłuż osi x , tabele: 6.35 oraz 6.36.

	F_x	F_y	F_z	N_x	N_y	N_z
0g:	-0.09595	-0.224334	-0.03061	0.0156737	-0.00951056	0.00727459
250g:	0.68138	-0.428515	1.04453	-2.29672	0.020405	0.0143393
500g:	-	-	-	-	-	-

Tablica 6.35: Pomiary momentów wokół osi x

Pomiar momentu siły dokonany wzdłuż osi y , tabele: 6.37 oraz 6.38.

Z uzyskanych wyników pomiarów momentów sił wzdłuż każdej z osi można dostrzec, że oprócz pomiaru wzdłuż osi x gdzie błąd wyniósł prawie aż 8% reszta uzyskanych wyników jest bardzo bliska poprawnym wartościom dla małych ciężarów, takich rzędu 250 – 500g. Uwzględniając przy tym sporą niedokładność wykorzystanej metody pomiarowej można stwierdzić, że dla nich wyniki te są bardzo dobre. Gorzej jest natomiast dla ciężarów rzędu 1 – 2kg i większych bo w tym przypadku dochodziło do sytuacji, w której uzyskiwane różnice pomiędzy wynikami jaki powinniśmy dostać, a jaki uzyskaliśmy potrafiły dochodzić do 1N. Na bazie przeprowadzonych eksperymentów wydaje mi się, że to

	F_x	F_x^{+bias}	$ F_o - F_x^{+bias} $	%
250g:	-2.29672	-2.2810463	0.1706162	6.95920421346739

Tablica 6.36: Pomiary dokonane wzdłuż osi x

	F_x	F_y	F_z	N_x	N_y	N_z
0g:	-0.0287185	-0.0377309	0.0860219	0.00418611	-0.00715638	0.00249564
250g:	-1.17295	-1.17134	4.72189	0.0783585	-2.45504	0.0230172
500g:	-	-	-	-	-	-

Tablica 6.37: Pomiary momentów wokół osi y

	F_x	F_x^{+bias}	$ F_o - F_x^{+bias} $	%
250g:	-2.45504	-2.46219638	-0.01053388	0.42966272886256

Tablica 6.38: Pomiary dokonane wzdłuż osi y

właśnie niedokładności w tym modelu, w kalibracji samego czujnika mogą być przyczyną jego złego funkcjonowania.

6.4.6 Korekta modelu

Uzyskane pomiary sprawiły, że dokonaliśmy następujących modyfikacji tego modelu:

- Współczynnik skalujący odpowiedzialny za pomiar siły wzdłuż osi y został zmodyfikowany tak, że stara wartość **4.5511972116989** została zastąpiona przez **4.29318937233766**.
- Współczynnik skalujący odpowiedzialny za pomiar siły wzdłuż osi z został zmodyfikowany tak, że stara wartość **1.41244051397552** została zastąpiona przez **1.34169354325007**.
- Współczynnik skalujący odpowiedzialny za pomiar momentu siły wzdłuż osi x został zmodyfikowany tak, że stara wartość **84.8843245576086** została zastąpiona przez **79.49931390122683**.
- Współczynnik skalujący odpowiedzialny za pomiar momentu siły wzdłuż osi z został zmodyfikowany tak, że stara wartość **80.9472037525247** została zastąpiona przez **79.51972422711154**.

Po tak dokonanych zmianach w modelu został przeprowadzony kolejny test mający na celu sprawdzenie czy takie modyfikacje rzeczywiście go poprawiły. Rezultaty testów pokazały, że rzeczywiście pomogły. Uzyskane wyniki okazały się trochę lepsze od tych uzyskanych przed zmianami.

Rozdział 7

Podsumowanie

Opracowana procedura automatycznego wyznaczenia modelu środka ciężkości narzędzia przytwierdzonego do czujnika sił okazała się być lepsza od wcześniejszej metody polegającej na umieszczeniu stałych parametrów tego modelu w pliku konfiguracyjnym. Wynika to z tego iż pozwala ona na zmianę tych parametrów po zmianie masy narzędzia podczas wykonywania zadania.

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych dowiedzieliśmy się, że nie tylko czynniki związane z oddziaływaniem siły grawitacji mogą wpływać na błędy odczytów sił. Błędy mogą być powodowane również niedokładnościami w określeniu modeli definiujących robota lub nawet błędami w samym czujniku. Eksperymenty mające ustalić, skąd biorą się poważne błędy korekty sił, doprowadziły do wniosku, że największe problemy tkwią w tymże czujniku, a dokładnie w jego kalibracji. Stąd chcąc poprawić jakość korekty odczytów sił należy w pierwszej kolejności skalibrować sam czujnik siły.

Bibliografia

- [1] ATI. Intelligent multi axis force torque sensor system. Technical report, ATI, 2007. [cytowanie na str. 7]
- [2] M. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar. *Robotics Modeling and Control*. John Wiley & Sons, New York, 2005. [cytowanie na str. 13]
- [3] W. Szykiewicz. Uruchamianie i obsługa systemu MRROC++. *Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej*, 1999. [cytowanie na str. 3]
- [4] T. Winiarski and C. Zieliński. Sterowanie interakcją manipulatora ze środowiskiem - część pierwsza. In *X Krajowa Konferencja Robotyki*, 2008. [cytowanie na str. 12]
- [5] C. Zieliński and W. Szykiewicz. Mrroc++ system for irp-6 robot. Technical Report nr 99-20, IAIS, May Warsaw, 1999. System MRROC++ dla robota IRp-6 na torze jezdny. [cytowanie na str. 3]
- [6] C. Zieliński, W. Szykiewicz, T. Winiarski, and T. Kornuta. MRROC++ Based System Description. Technical Report 06-9, IAIS, Warsaw, 2006. [cytowanie na str. 3]
- [7] C. Zieliński, T. Winiarski, W. Szykiewicz, M. Staniak, W. Czajewski, and T. Kornuta. MRROC++ Based Controller of a Dual Arm Robot System Manipulating a Rubik's Cube. Technical Report 06-10, IAIS, Warsaw, 2006. [cytowanie na str. 3]

Spis rysunków

2.1	struktura ramowa MRROC++	4
3.1	Wektory sił i momentów sił przyłożonych do czujnika	8
3.2	Przykład siły przyłożonej do czujnika	8
3.3	Schemat przepływu pomiarów z czujnika siły (elektroniczne połączenie czujnika z komputerem).	9
3.4	Podłączenie czujnika w przypadku manipulatora on_track	10
3.5	Podłączenie czujnika w przypadku manipulatora postument	11
3.6	Struktura manipulatora i rozmieszczenie poszczególnych układów odniesienia	12
5.1	Pozycja 1	22
5.2	Pozycja 2	22
5.3	Pozycja 3	23

Spis tablic

4.1	Odczyty z czujnika rzeczywistego	20
4.2	Odczyty uzyskane ze stworzonego modelu	20
5.1	27
5.2	27
5.3	Test modelu	29
5.4	Test modelu	29
5.5	Model środka ciężkości bez dodatkowego obciążenia	29
5.6	Test modelu bez dodatkowych przedmiotów	30
5.7	Test modelu z kostką	31
5.8	Model transformacji sił z kostką	31
5.9	Test modelu z odważnikiem	31
5.10	Model transformacji sił z odważnikiem 250g	32
5.11	Model środka ciężkości z kostką umieszczoną w chwytaku	32
5.12	Test modelu z kostką	32
6.1	Wynik testu modelu kinematyki ${}^0_W T$	36
6.2	Test modelu bez zaburzeń	37
6.3	Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi x o 1cm	38
6.4	Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi x o 5cm	38
6.5	Test zaburzonego modelu, przesunięcie w osi x o 1 i 5cm	39
6.6	Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi y o 1cm	39
6.7	Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi y o 5cm	40
6.8	Test zaburzonego modelu, przesunięcie w osi y o 1 i 5cm	40
6.9	Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi z o 1cm	41
6.10	Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi z o 5cm	41
6.11	Test zaburzonego modelu, przesunięcie w osi z o 1 i 5cm	42
6.12	Wyniki uzyskane dla przesunięcia w osi x, y oraz z o 5cm	42
6.13	Test zaburzonego modelu, przesunięcie w osi x, y oraz z o 5cm	43
6.14	Wyniki uzyskane dla obrócenia w osi x o 5°	44
6.15	Test zaburzonego modelu, obrót w osi x o 5°	44

6.16 Wyniki uzyskane dla obrócenia w osi y o 5°	45
6.17 Test zaburzonego modelu, obrót w osi y o 5°	45
6.18 Wyniki uzyskane dla obrócenia w osi z o 5°	46
6.19 Wyniki uzyskane dla obrócenia w osi z o 0.527331630670162°	46
6.20 Wyniki uzyskane dla obrócenia w osi z o -0.61858395959149°	47
6.21 Test zaburzonego modelu	48
6.22	48
6.23 Wyniki uzyskane dla zaburzenia wagi narzędzia o 5%	49
6.24 Wyniki uzyskane dla zaburzenia wagi narzędzia o 10%	49
6.25 Pomiary dokonane wzdłuż osi z	51
6.26 Pomiary dokonane wzdłuż osi z	51
6.27 Pomiary dokonane wzdłuż osi x det	51
6.28 Pomiary dokonane wzdłuż osi x	52
6.29 Pomiary dokonane wzdłuż osi x obróconej o 180°	52
6.30 Pomiary dokonane wzdłuż osi x obróconej o 180°	52
6.31 Pomiary dokonane wzdłuż osi y	52
6.32 Pomiary dokonane wzdłuż osi y	53
6.33 Pomiary momentów wokół osi z	53
6.34 Pomiary dokonane wzdłuż osi z	53
6.35 Pomiary momentów wokół osi x	53
6.36 Pomiary dokonane wzdłuż osi x	54
6.37 Pomiary momentów wokół osi y	54
6.38 Pomiary dokonane wzdłuż osi y	54