

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej

Praca inżynierska

Sprzęg czujnika siły ATI-IA F/T 3084 Gamma z komputerem PC

Maciej Łukasz Kulesza

Promotor: mgr inż. Tomasz Winiarski

Warszawa, 2009

Streszczenie

Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie oraz uruchomienie nowego kontrolera czujnika siły i momentów sił ATI-IA F/T 3084 Gamma. Urządzenie zajmuje się akwizycją i wstępnym przetworzeniem danych z czujnika oraz komunikacją z komputerem klasy PC poprzez interfejs UART.

Zastąpienie obecnego rozwiązania miało na celu wyzbycie się wad przestarzałego sprzęgu oraz umożliwienie implementacji w przyszłości komunikacji z czujnikiem za pomocą interfejsów Ethernet lub CAN.

Urządzenie oparte zostało o gotową płytkę prototypową z mikrokontrolerem z rdzeniem ARM7, LPC2378. Dodatkowo została wykonana płytka sprzęgu elektronicznego z czujnikiem sił dołączona do płytki z mikrokontrolerem. Całość zamknięto w obudowie umożliwiającej zamontowanie kontrolera na manipulatorze IRp-6, w którym zainstalowany jest czujnik.

Powstałe w ramach pracy rozwiązanie spełnia wszystkie założenia projektowe, a jego poprawność została zweryfikowana przeprowadzonymi w laboratorium testami.

Abstract

Title: PC computer interface of ATI-IA 3084 Gamma Force/Torque sensor.

Aim of this thesis was design and launch of a new ATI-IA F/T 3084 Gamma sensor controller. Device task is acquisition and reprocessing of sensor data, as well as communication with a PC computer via UART interface.

Reasons of replacing current solution was disposing of obsolete interface shortcomings and enabling the implementation of communication with the sensor through Ethernet or CAN interface.

Device was based on a ready-made prototype board with an ARM7-core based microcontroller LPC2378. Sensor electronic interface board was made and connected to the prototype board. Entire device was placed in a casing that allows attaching it on the IRp-6 manipulator in which the sensor is installed.

Resulting solution matches all project requirements and its correctness was verified by tests conducted in the robotics laboratory.

...

Podziękowania

Chciałbym wyrazić moje podziękowania promotorowi, Tomkowi Winiarskiemu, za świetną współpracę i nauczenie zdrowego podejścia do realizacji projektów oraz Tomkowi Sobczukowi, za podzielenie się swoim czasem i obszerną wiedzą z zakresu elektroniki.

Spis treści

Spis treści	i
1 Wstęp	1
1.1 Wprowadzenie	1
1.2 Motywacja	1
1.3 Cel pracy	2
1.4 Układ pracy	2
2 Czujnik siły i jego dotychczasowy sprzęg	5
2.1 Czujnik siły i momentów sił ATI-IA F/T 3084 Gamma	5
2.1.1 Podstawowe informacje	5
2.1.2 Zasada działania	7
2.1.3 Interfejs elektroniczny czujnika	10
2.2 Istniejący sprzęg czujnika i komputera PC	12
3 Opis użytych narzędzi i technologii	15
3.1 Sprzęt	15
3.1.1 Płytki prototypowa Olimex LPC-P2378	15
3.1.2 Metoda fotolitografii	17
3.2 Oprogramowanie	19
3.2.1 Altium Designer 6	19
3.2.2 IAR Embedded Workbench for ARM	21
4 Realizacja prototypu	25
4.1 Projekt elektroniczny nowego interfejsu czujnika	26
4.1.1 Schemat elektroniczny	26

4.1.2	Schemat płytki drukowanej	31
4.2	Oprogramowanie mikrokontrolera	31
4.3	Obudowa	36
5	Podsumowanie	37
5.1	Testy	37
5.1.1	Sposób przeprowadzenia	37
5.1.2	Wyniki	38
5.2	Perspektywy rozwoju	40
5.3	Wnioski	41
	Bibliografia	47
A	Dane kalibracyjne czujnika ATI-IA Force/Torque 3084 Gamma	49

Rozdział 1

Wstęp

1.1 Wprowadzenie

Od dawien dawna targani plagą lenistwa ludzie szukali sposobów na ułatwienie sobie życia. Powstawały wynalazki od najprostszych, jak koło, po skomplikowane inżynierskie konstrukcje w postaci robotów. Ich zadaniem było wyręczenie człowieka w czynnościach żmudnych i niebezpiecznych. Początkowo roboty stosowane były głównie w fabrykach, gdzie wykonywały proste, powtarzalne czynności. Działały w ustalonym, nie zmieniającym się środowisku hal produkcyjnych stąd nazywane były robotami przemysłowymi. Z biegiem czasu zaszła potrzeba umożliwienia im przystosowania się do zachodzących naokoło ich zmian w trakcie wykonywania powierzonych im czynności. Niezbędne było więc wyposażenie ich w odpowiedniki ludzkich zmysłów. Ulepszenie to przybrało formę kamer jako wzroku, mikrofonów w miejsce słuchu, czujników siły w zastępstwie dotyku itp. Ponieważ czynności wykonywane są w czasie rzeczywistym, priorytetem jest prędkość pozyskiwania informacji z sensorów oraz szybkość ich przetwarzania.

1.2 Motywacja

Dotychczasowy model sprzęgu czujnika siły posiadał istotne wady:

- Duże rozmiary kontrolera uniemożliwiały umieszczenie go w bliskiej odległości od czujnika, na robocie IRp-6. Znaczny postęp technologiczny od czasu wyprodukowania tego urządzenia pozwala na jego relatywnie łatwą i taną miniaturyzację.

- Z faktu umieszczenia kontrolera poza manipulatorem wynika konieczność zastosowania znacznie dłuższego przewodu łączącego kontroler z czujnikiem, co jest niekorzystne, z uwagi na cenę tego przewodu.
- Wyjście danych z kontrolera, o dużej szybkości, jest niekompatybilne z powszechnie stosowanymi interfejsami, przez co zachodzi potrzeba zastosowania dedykowanego sprzęgu. W jego skład wchodzi konwerter sygnałów z kontrolera czujnika do interfejsu ULTRA-SCSI i karta Advantech PCI-1751 zainstalowana w komputerze PC.
- Z powodu zastosowania wielu urządzeń i interfejsów na drodze czujnik-komputer, wzrasta ryzyko usterki tego sprzęgu.
- kontroler jest unikalnym urządzeniem, którego odtworzenie w razie awarii pochłonie znaczną ilość czasu.

1.3 Cel pracy

Celem pracy jest zastąpienie istniejącego sprzęgu czujnika, nowym z uwzględnieniem następujących założeń projektowych:

- Nowy sprzęg ma zapewniać uzyskanie pomiarów zbliżonej jakości (w sensie precyzji i dokładności) do tych otrzymywanych z istniejącego kontrolera.
- Niewielki rozmiar urządzenia umożliwiający zainstalowanie go w pobliżu czujnika sił i momentów sił.
- Sprzęg powinien posiadać interfejs Ethernet, CAN, RS-232.

1.4 Układ pracy

Niniejsza praca została podzielona tematycznie na następujące rozdziały obrazujące kolejne kroki podjęte w celu spełnienia ustalonych założeń:

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie w tematykę pracy, wyjaśniając co przyczyniło się do jej powstania oraz przedstawiając przyjęte założenia projektowe.

Rozdział 2 opisuje czujnik siły i momentów sił ATI-IA F/T 3084 Gamma wraz z kontrolerem oraz sposobem jego podłączenia do komputera PC. Zawarte

tu informacje pochodzą zarówno z dostępnych dokumentacji technicznych, jak i z przeprowadzonych w ramach pracy badań i eksperymentów.

Rozdział 3 prezentuje narzędzia oraz procesy użyte podczas realizacji pracy.

Rozdział ten podzielono na dwie sekcje. Sekcja Sprzęt opisuje użytą płytkę prototypową oraz sposób wykonania nowej płytki drukowanej sprzęgu. Z kolei sekcja Oprogramowanie przedstawia aplikacje użyte do zaprojektowania płytki oraz zaprogramowania mikrokontrolera.

Rozdział 4 podaje szczegóły użycia wymienionych narzędzi i technologii do zrealizowania przyjętych założeń. Zawarte są tu informacje jak zaprojektowano i uruchomiono nowy sprzęg czujnika siły i momentów sił z komputerem PC.

Rozdział 5 zawiera ewaluację rozwiązania, wyniki przeprowadzonych testów oraz wnioski wyciągnięte podczas pracy nad nowym sprzęgiem.

Rozdział 2

Czujnik siły i jego dotychczasowy sprzęg

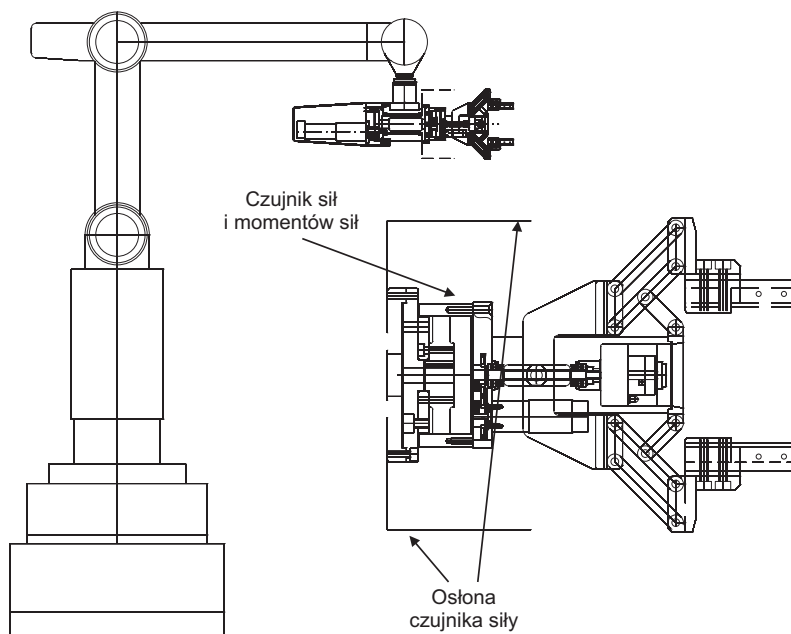
2.1 Czujnik siły i momentów sił ATI-IA F/T 3084 Gamma

2.1.1 Podstawowe informacje

Czujnik siły (wyprodukowany przez ATI Industrial Automation) został zakupiony za pośrednictwem niemieckiej firmy Schunk. Zainstalowanie go na manipulatorze IRp-6 miało na celu umożliwienie przekształcenia dużego robota przemysłowego w maszynę mogącą pracować w nieustrukturyzowanym środowisku. Dodanie "zmysłu" dotyku zapewnia lepszą kontrolę nad robotem oraz większe bezpieczeństwo dla ludzi znajdujących się w pobliżu. Dzięki poszerzonym możliwościom można użyć manipulatora jako robota usługowego.

Czujniki siły można montować w wielu miejscach robota, lecz wartościowym rozwiązaniem jest zainstalowanie go przed końcówką manipulatora. Tam dokładny pomiar jest najkorzystniejszy, ponieważ to chwytak wykonuje najbardziej precyzyjne operacje, podczas gdy pozostałe siły można mierzyć pośrednio, np. poprzez badanie ilości prądu płynącego przez silniki. Tak też został zamontowany czujnik FT3084, co widać dokładnie na rysunku 2.1. Dzięki takiemu rozwiązaniu można mierzyć i wykorzystywać pomiary wszystkich sił działających bezpośrednio na chwytak manipulatora IRp-6.

Czujnik został oparty na kalibracji SI-65-5. Oznacza to, że jednostki pochodzą z systemu metrycznego i są to niutony (N) dla pomiarów sił oraz niutonometry



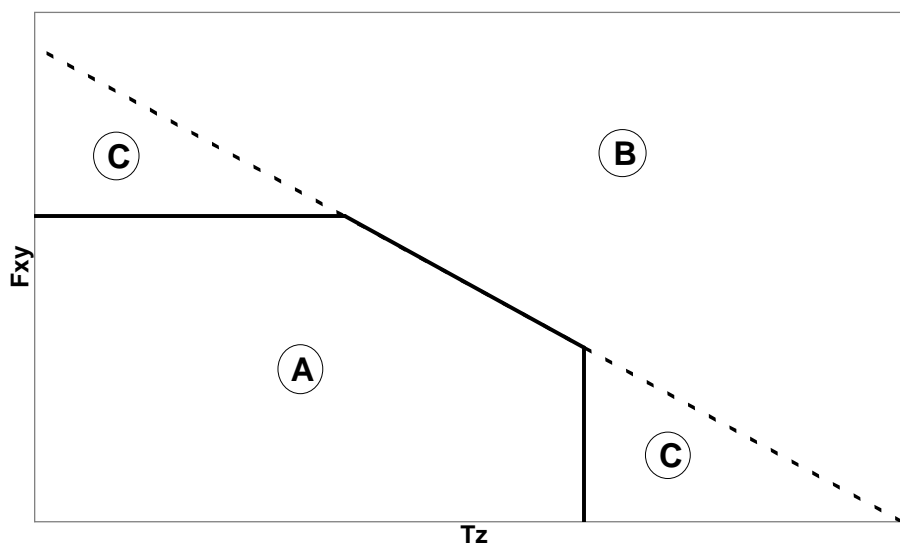
Rysunek 2.1: Manipulator IRp-6 z chwytakiem wyposażonym w czujnik sił i momentów sił [7].

Zakres pomiarowy	
F_x, F_y	$\pm 65 \text{ N}$
F_z	$\pm 200 \text{ N}$
T_x, T_y, T_z	$\pm 5 \text{ Nm}$
Rozdzielczość (minimalna)	
F_x, F_y	$1/20 \text{ N}$
F_z	$1/10 \text{ N}$
T_x, T_y, T_z	$3/1000 \text{ Nm}$
Zawartość jednostek	
F_x, F_y, F_z	$20/\text{N}$
T_x, T_y, T_z	$333.3/\text{N}$

Tabela 2.1: Parametry pomiarów czujnika FT3084 [1].

(Nm) dla momentów. Pozostałe liczby w oznaczeniu wskazują na maksymalne wartości odczytów, czyli 65 N dla sił w kierunkach X i Y oraz 5 Nm dla momentów sił. Dokładne parametry odczytów znajdują się w tabeli 2.1.

W praktyce możliwe jest otrzymanie błędnych odczytów bez przekroczenia pojedynczych zakresów pomiarowych. Wykresy 2.3, 2.4 pokazują zależności pomiędzy siłami i momentami, przy których może powstać tzw. przeładowanie.



Rysunek 2.2: Przykładowy wykres zakresu pomiarowego czujnika sił i momentów sił [1], gdzie: [A] Normalny zakres pomiarowy. Przewidywana nominalna dokładność, [B] Przekroczony zakres pomiarowy. Występuje błędny odczyt, [C] Rozszerzony zakres pomiarowy. W tym zakresie czujnik nadal działa, lecz pełna dokładność nie jest gwarantowana.

Interpretacja poprzednich wykresów przedstawiona jest na wykresie 2.2.

Wykres 2.3 przedstawia kombinację sił w kierunkach X i/lub Y z momentem wokół osi Z, wykres 2.4 natomiast kombinację siły wzdłuż osi Z oraz momentów wokół osi X i/lub Y.

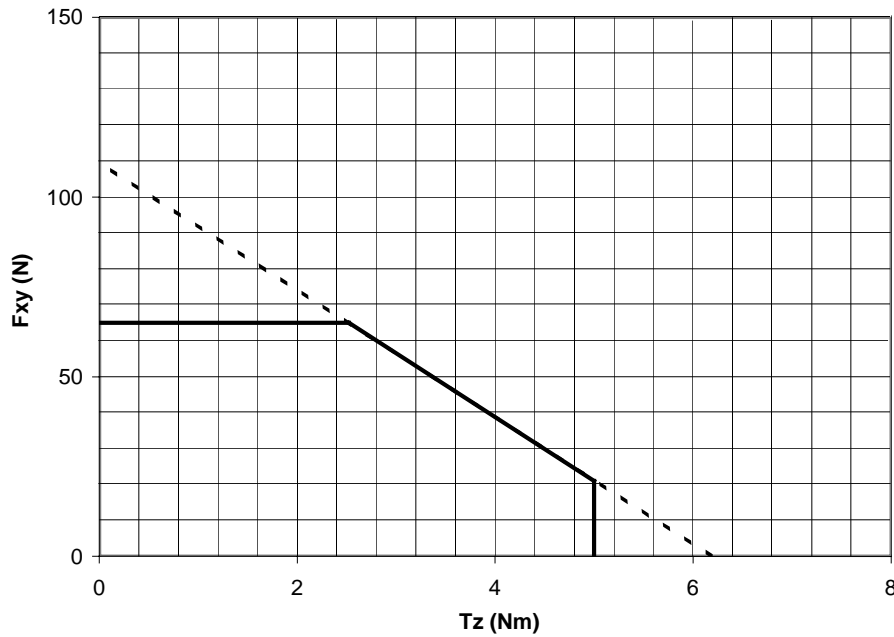
2.1.2 Zasada działania

Działanie czujnika opiera się na III zasadzie dynamiki sformułowanej przez Izaaka Newtona, zwanej również zasadą akcji i reakcji. Brzmi ona następująco:

Jeśli ciało A działa na ciało B siłą \vec{F}_{AB} to ciało B działa na ciało A siłą \vec{F}_{BA} o takiej samej wartości i kierunku, lecz o przeciwnym zwrocie.

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

Czujnik jest oparty na systemie sześciu odpowiednio rozmieszczonych tenzometrów naklepanych na trzy niezależne belki umieszczone w środku czujnika, które



Rysunek 2.3: Zakres dokładności pomiarów czujnika F/T 3084 Gamma [1]. Siły F_x i F_y oraz moment siły T_z .

reagują na działające na czujnik siły, przekształcając je na sygnały elektryczne. Odkształcenie materiału sprężystego opisuje prawo Hooke'a:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.1)$$

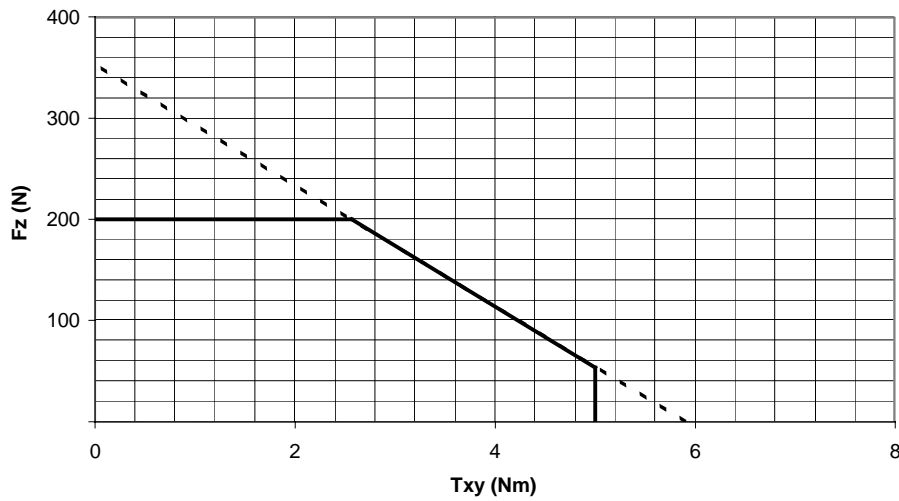
gdzie: σ - naprężenie (proporcjonalne do siły), E - moduł Younga (zależy od użytego materiału), ϵ - odkształcenie względne.

Tensometry można uznać za rezystory wrażliwe na naprężenia. Ich rezystancję przedstawia następująca funkcja:

$$\Delta R = S_a \cdot R_0 \cdot \epsilon \quad (2.2)$$

gdzie: ΔR - zmiana rezystancji, S_a - współczynnik tensometrów, R_0 - rezystancja tensometru bez obciążenia, ϵ - odkształcenie względne.

Kontroler czujnika na podstawie informacji z tensometrów oblicza faktyczne wartości działających sił, i momentów sił w kartezyjańskim układzie czujnika. Dzięki temu na wyjściu utrzymuje się sześć wartości: F_x , F_y , F_z (siły) oraz T_x , T_y i T_z (momenty sił) [1]. Położenie wektorów sił i momentów sił jest zobrazowane na rysunku 2.5.



Rysunek 2.4: Zakres dokładności pomiarów czujnika F/T 3084 Gamma [1]. Siła F_z oraz momenty sił T_x i T_y .

Sposób w jaki przeliczane są odczyty z tensometrów na wartości sił prezentuje poniższe równanie [2]:

$$FT_{RAW} = [C \cdot SG_{TC}]^T \quad (2.3)$$

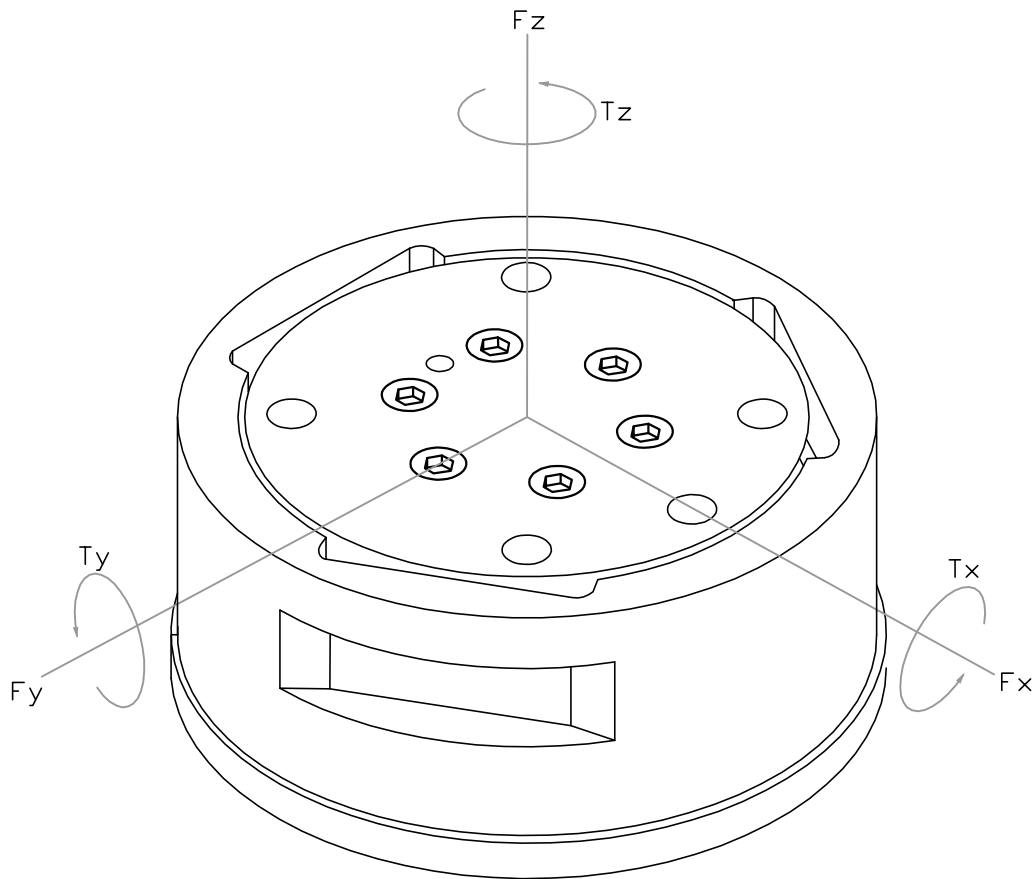
gdzie: FT_{RAW} to skalibrowana tablica 1x6, w której znajdują się kolejno $[F_x \ F_y \ F_z \ T_x \ T_y \ T_z]$, C - jest to tabela kalibracji, unikalna dla każdego wyprodukowanego czujnika. Jej rozmiar to 6x6, w przypadku użytego czujnika dwie ostatnie, nadmiarowe kolumny wypełnione są zerami. Dane znajdują się w załączniku A, SG_{TC} - zawiera dane otrzymane z tensometrów, po kompensacji temperaturowej lub bez niej.

Współczynniki rezystancji tensometrów zależą w pewnej mierze od temperatury w jakiej się znajdują. Dodatkowo w czujniku umieszczono więc termistor, dzięki któremu jest możliwa kompensacja niechcianego wpływu otoczenia na odczyty. Wymaga to dodatkowych obliczeń [2]:

$$SG_{TC_n} = SG_{ZC_n} \times (1 + M_{MTC} \times \Delta T) \quad (2.4)$$

$$SG_{ZC_n} = SG_{RAW_n} + B_{MTC_n} \times \Delta T \quad (2.5)$$

$$\Delta T = T_R - T_{CAL} \quad (2.6)$$



Rysunek 2.5: Czujnik siły i momentów sił FT3084

SG_{TC_n} - skompensowany odczyt z tensometru n

SG_{RAW_n} - odczyt z tensometru n

M_{MTC} - poziom wzrostu (dane kalibracyjne)

B_{MTC_n} - poziom odniesienia (dane kalibracyjne)

T_R - odczyt z termistora

T_{CAL} - odczyt z termistora podczas kalibracji

2.1.3 Interfejs elektroniczny czujnika

Kontroler jest podłączany do czujnika za pomocą 15-pinowego złącza D-Sub. Podczas projektowania sprzęgu były dostępne jedynie szczątkowe informacje na temat interfejsu czujnik-kontroler. Były to nazwy kodowe oraz numery linii, któ-

Linia D-Sub	Symbol	Źródło	Opis
1	VA+	Kontroler	Dodatnie napięcie zasilania (+15V)
2	VA-	Kontroler	Ujemne napięcie zasilania (-15V)
9	GND	Kontroler	Masa zasilania
5	SG+	Kontroler	Zasilanie tensometrów (okresowe +5V)
12	SG-	Kontroler	Zasilanie tensometrów (okresowe -5V)
4	BIAS+	Kontroler	Dodatni poziom odniesienia z przetwor- nika ADC (+10V)
11	BIAS-	Kontroler	Ujemny poziom odniesienia (zwar- te do masy)
8	MUX0	Kontroler	Linie wyboru wyjścia (0V, +5V) w kodzie Gray'a
15	MUX1	Kontroler	
7	MUX2	Kontroler	
3	SIG+	Czujnik	Analogowy odczyt z czujnika
10	SIG-	Czujnik	Odwrócony analogowy odczyt z czujnika

Tabela 2.2: Opis sygnałów interfejsu czujnika sił i momentów sił.

Sensor	Kod $A_2A_1A_0$
Tensometr 0	000
Tensometr 1	001
Tensometr 2	011
Tensometr 3	010
Tensometr 4	110
Tensometr 5	111
Termistor	101
Nie używane	100

Tabela 2.3: Kody wyjścia czujnika

re okazały się błędne. Większość zawartych tu informacji pochodzi z badania poziomów napięć multimetrem oraz przebiegu czasowego oscyloskopem. Owocne okazało się również badanie dotychczasowego kontrolera firmy ATI-IA metodą inżynierii odwrotnej (ang. reverse engineering).

Dane na temat poszczególnych linii interfejsu D-Sub czujnika znajdują się w tabeli 2.2. Oprócz wymienionych pozostają jeszcze trzy nieużywane linie złącza D-Sub 15 o numerach 6, 13 i 14.

Zasilanie czujnika Czujnik jest zaprojektowany do pracy z zasilaniem $\pm 15V$, ale według producenta będzie działał na niższym poziomie napięć, do $\pm 9V$. Pobiera nie więcej niż $\pm 15mA$ prądu. Zasilanie powinno być dobrej jakości o niskim poziomie szumów i małych zawahaniach amplitudy [2].

Zasilanie tensometrów Na liniach SG+ i SG- różnicowo przesyłane jest 5V z kontrolera służące do zasilenia tensometrów. Jest to krótki impuls prostokątny trwający 250 ns i wysyłany tuż po zmianie na liniach MUXn. Eksperymentalnie dowiedziono, że brak impulsu nie ma większego wpływu na działanie czujnika, lecz nie jest to zalecane przez producenta.

Poziom odniesienia Jest to poziom referencyjny, względem którego tensometry przesyłają odczyty. Normalnie jest to +10V na linii BIAS+, natomiast BIAS- jest zwarty do masy. W kontrolerze producenta, jak również w proponowanym rozwiązaniu sygnał ten jest podawany z wyjścia ReferenceOut przetwornika ADC.

Linie wyboru MUXn Linie MUXn służą do wyboru konkretnego tensometru lub termistora, z którego przesyłane są odczyty. Wyjścia są zakodowane w kodzie Gray'a, a ich spis znajduje się w tabeli 2.3. Poziomy napięcie to +5V (logiczna "1") i 0V (logiczne "0").

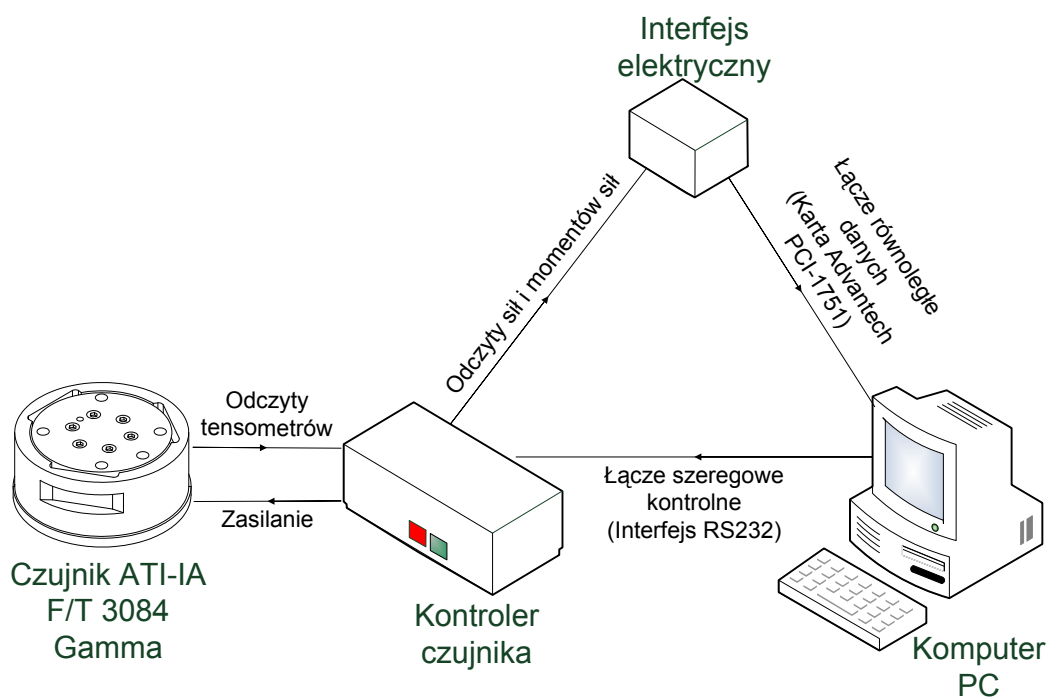
Analogowy odczyt z czujnika Odczyt z czujnika jest podawany różnicowo na dwóch liniach (SIG+ i SIG-) Został zaprojektowany do pracy jako wejście wzmacniacza operacyjnego o wysokiej rezystancji wejściowej i małej pojemności. Wzmacniacz producenta charakteryzuje się rezystancją wejściową $60M\Omega$ oraz wejściową pojemnością 5pF. Użycie wzmacniacza o mniejszej rezystancji wejściowej niż $10M\Omega$ spowoduje niedokładność pomiarów oraz zwiększy ilość prądu pobieranego przez czujnik. Natomiast wzmacniacz o dużej pojemności wejściowej może spowodować dłuższy czas ustalania się sygnału oraz wywołać oscylacje [2]. Maksymalna różnica sygnałów wynosi 10V.

2.2 Istniejący sprzęg czujnika i komputera PC

Rysunek 2.6 przedstawia sposób komunikacji czujnika z komputerem PC.

Jednym z najważniejszych elementów obecnego sprzęgu jest kontroler czujnika siły. Jest on podłączony do czujnika siły za pomocą 12-żyłowego ekranowego przewodu. Jego zadaniem jest zasilanie czujnika, akwizycja odczytów z tensometrów oraz przeliczenie ich do wyjściowych wartości sił i momentów sił.

Komunikacja kontrolerem odbywa się poprzez łącze szeregowo-równoległe. Składa się ono z interfejsu szeregowego RS232, który służy do przesyłania rozka-



Rysunek 2.6: Schemat przepływu danych z czujnika siły i momentów sił.

zów do kontrolera i nadzoru jego działania. Dane natomiast przesyłane są poprzez wyjście cyfrowe, połączone z interfejsem elektrycznym. Jego zadaniem jest konwersja sygnałów do złącza ULTRA-SCSI karty Advantech PCI-1751 umieszczonej w komputerze PC.

Rozdział 3

Opis użytych narzędzi i technologii

3.1 Sprzęt

3.1.1 Płytką prototypowa Olimex LPC-P2378

Tworzenie urządzeń z mikrokontrolerem bywa pracochłonne oraz ryzykowne. Często wprowadza się etap realizacji prototypu, żeby umożliwić wstępną weryfikację proponowanego rozwiązania. W tym celu stosuje się najczęściej płytki prototypowe, aby uniknąć problemów związanych z projektem otoczenia mikrokontrolera. Znacznie ułatwia to również wszelkie modyfikacje projektu elektronicznego, które nie muszą być wprowadzane do działającej poprawnie płytki, lecz do projektowanego przez nas otoczenia.

Wybór mikrokontrolera służącego do realizacji prototypu padł na LPC-2378 firmy NXP z rdzeniem ARM-7. Jest to bardzo wydajny układ 16/32 bitowy mogący pracować z częstotliwością 72 MHz, co jest w zupełności wystarczające do obsługi starszego czujnika, a dodatkowo umożliwia przeniesienie części obliczeń związanych z używaniem czujnika siły do kontrolera czujnika.

Użyta płytką prototypowa z wymienionym kontrolerem o oznaczeniu LPC-P2378 posiada następujące cechy:

- mikrokontroler LPC2378 (16/32 bit ARM7TDMI-STM, 512KB Program Flash, 58KB RAM, EXTERNAL MEMORY BUS, RTC, 4x 10 bit ADC 2.44 uS, 2x UARTs, 4x CAN, I2C, SPI, 2x 32bit TIMER, 7x CCR, 6x

PWM, WDT, 5V tolerant I/O, fmax 60MHz)

- standardowe złącze JTAG ARM 2x10 pin służące do programowania/debugowania układu,
- Ethernet 100MBit,
- interfejs RS232,
- interfejs CAN,
- interfejs USB,
- gniazdo kart SD/MMC,
- złącze UEXT do podłączenia dodatkowych modułów firmy Olimex (MP3, RF2.4Ghz, RFID itd.),
- układ RESETu z możliwością kontroli przez RS232,
- jumpery ISP/RUN,
- 2 przyciski,
- przycisk reset,
- 2 stabilizatory napięcia 3V i 5V 800mA,
- wyprowadzone porty mikrokontrolera,
- źródło zasilania: zasilacz, USB lub JTAG,
- pole prototypowe,
- dioda LED sygnalizująca zasilanie,
- pcb: FR-4, 1.5 mm,
- wymiary: 100x130mm (3.94x5.12”),

Szybki i wydajny rdzeń, architektura RISC, interfejs ethernet, który docelowo ma służyć do komunikacji z czujnikiem oraz wyprowadzone porty mikrokontrolera są głównymi zaletami użytej płytki prototypowej. Do wyboru przyczyniła się również duża popularność mikrokontrolerów z serii ARM, co skutkuje dobrym wsparciem oraz dużą ilością materiałów i kodów źródłowych pomocnych podczas używania mikrokontrolera.

3.1.2 Metoda fotolitografii

Jest wiele sposobów uzyskania płytki drukowanej. Najczęściej używaną przez profesjonalistów i firmy trudniące się ich wykonywaniem jest metoda fotolitografii. Można stosunkowo łatwo dostosować ten proces do warunków amatorskich, dzięki łatwej dostępności wielu potrzebnych składników.

Idea tej metody jest bardzo podobna do wywoływania zdjęć. Światłoczuły lakier, którym pokrywa się laminat (krzemową płytkę pokrytą miedzią) naświetla się przez maskę ze wzorem ścieżek światłem UV. Dzięki temu zabiegowi część lakieru jest podatna na wypłukiwanie odpowiednim wywoływaczem, który najczęściej składa się z wodorotlenku sodu (NaOH). Po zmyciu części lakieru, pozostała warstwa chroni znajdującą się pod nią miedź przed kwasem, dzięki czemu ścieżki pozostają, natomiast reszta jest gotowa do wytrawiania.

Rozróżniane są dwa rodzaje lakierów światłoczułych: pozytywny i negatywny. Lakier pozytywny charakteryzuje się tym, że część naświetlona zostaje rozpuszczona podczas wywoływania, natomiast lakier negatywny "utwardza się" podczas naświetlania, przez co wypłukuje się część nienaświetlona.

Następujące narzędzia i substancje są niezbędne do wykonania płytek tą metodą:

Lampa UV użyte zostały 2 lampy 36 Watt (4*9W) służące pierwotnie do utwardzania paznokci żelowych,

Lakier światłoczuły Positiv 20 firmy Kontakt Chemie,

Wywoływacz znakomicie nadaje się popularny Kret do rur, ponieważ zawiera 60-90% NaOH,

Maska wydruk drukarką laserową na folii przezroczystej, półmatowej

Zacisk służy do docisnięcia maski do płytki z lakierem, najlepiej do tego celu nadaje się szkło akrylowe (plexiglas), ponieważ przepuszcza promieniowanie UV i łatwo się wycina oraz kilka zacisków biurowych.

Lakier ochronny tworzy warstwę ochronną zabezpieczającą laminat przed szkodliwym działaniem powietrza. Użyto Plastik 70 firmy Kontakt Chemie.

Proces produkcji płytki można podzielić na następujące etapy, wymagające dużej uwagi do otrzymania zadowalających wyników:

1. Przygotowanie maski - należy wydrukować projekt płytki w skali 1:1, na folii przezroczystej. Jakość wydruku wpływa w znacznym stopniu na końcowy efekt. Najlepszym wyborem jest drukarka laserowa oraz folia półmatowa FOLEX jako medium. Jeśli płytka ma być dwuwarstwowa, jeden z wydruków musi być w odbiciu lustrzanym. Trzeba przy tym uważać, aby można było przyłożyć maskę do emulsji stroną wydrukowaną, zapobiegając w ten sposób rozpraszaniu się światła przez folię pod wydrukiem. Maski obydwu warstw należy scentrować i unieruchomić np. poprzez sklejenie dwóch boków taśmą.
2. Przygotowanie płytki - laminat należy przyciąć i oczyścić przed nałożeniem emulsji. Wycinać warto z 0,5-1 cm marginesem. Oczyszczanie natomiast należy zacząć od dokładnego odtłuszczenia płytki, dzięki czemu lakier lepiej będzie się rozprzewadzał po powierzchni. Uzyskano dobre rezultaty z preparatem Cillit Kamień i Rdza. Dodatkowo można lekko wypolerować płytkę bardzo drobnym papierem ściernym, np. na mokro papierem ściernym o grubości P1000. Nie należy po oczyszczeniu dotykać płytki palcami. Użyty został metalowy zacisk biurowy ułatwiający późniejsze mocowanie laminatu do suszenia.
3. Naniesienie warstwy emulsji - należy rozprzewadzić cienką, równomierną warstwę emulsji światłoczułej ruchem wahadłowym, rozpoczynając i kończąc opryskiwanie poza powierzchnią laminatu. Rozpylanie należy przeprowadzać pod małym kątem z odległości około 20 cm. Wszystkie etapy w których jest jeszcze nie wywołana emulsja wymagają lekko przyciemnionego, najlepiej sztucznego oświetlenia.
4. Suszenie - po naniesieniu warstwy emulsji trzeba umieścić laminat w pozycji poziomej. Suszenie lakieru trwa 24 godziny w temperaturze pokojowej, lecz można przyspieszyć suszenie podnosząc temperaturę do maksymalnie 70 °C. Użyto nagrzewnicy typu Farel dmuchającej ciepłym powietrzem o temperaturze 50 °C. Po 15 minutach suszenia bez nagrzewnicy w celu dokładnego rozprzewadzenia się lakieru oraz 45 minutach w cieplejszych warunkach lakier jest gotowy do naświetlania.
5. Przygotowanie do naświetlania - płytkę z naniesioną emulsją należy włożyć między wydrukowane maski, po czym przyłożyć z obu stron pleksi i docisnąć

kilkoma metalowymi zaciskami biurowymi ze wszystkich stron, upewniając się, że plexiglas równo przylega.

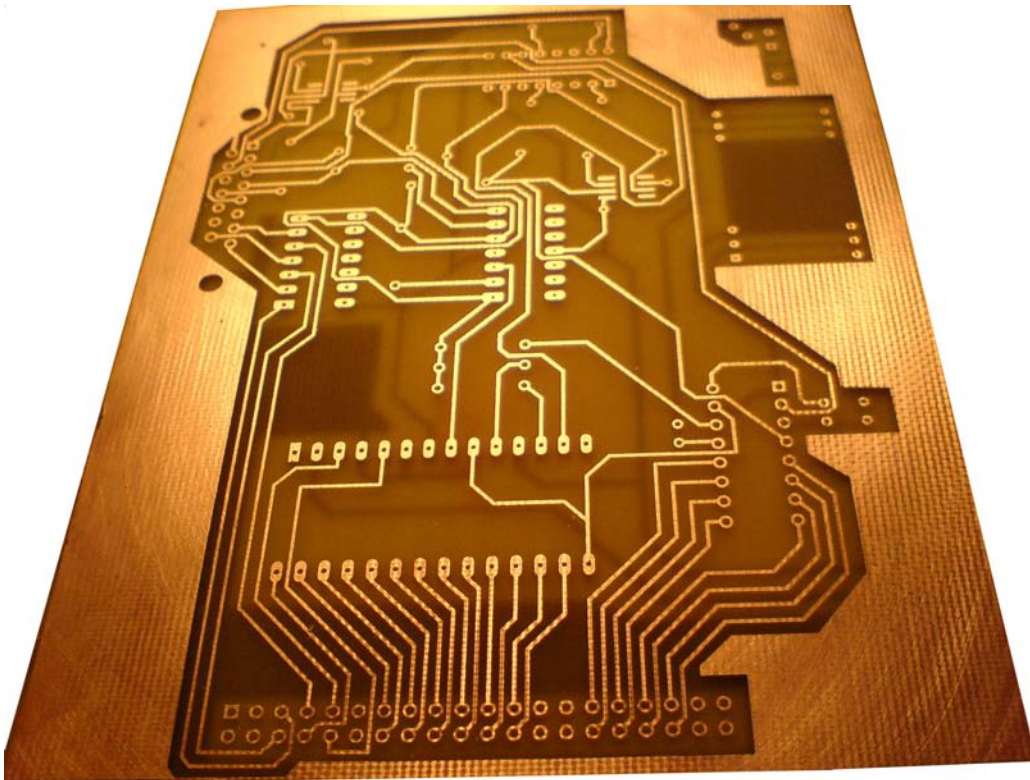
6. Naświetlanie - długość naświetlania zależy od grubości warstwy naniesionego lakieru oraz oświetlenia. Przy cienkiej warstwie lakieru, użytych lampach naświetlających z dwóch stron płytkę z odległości 30 cm optymalny czas naświetlania wynosił 8 minut. Wartość tą należy dobrać eksperymentalnie dostosowując do własnych warunków.
7. Wywoływanie - w przypadku użytego lakieru Positiv 20 wywoływanie skutkuje wypłukaniem części naświetlonej w poprzednim etapie. Użyto roztworu preparatu Kret wsypując 9 g do litra lekko ciepłej wody w kuwecie. Wkładając laminat należy zapewnić ruch kąpieli. Po około 2-3 minutach powinien pojawić się wzór płytki. Nie należy trzymać jej za długo w roztworze, ponieważ skutkuje to wypłukaniem całego lakieru. Na tym etapie można ocenić jakość wykonania poprzednich kroków i prawidłowość długości naświetlania. W przypadku problemów można zmyć cały lakier acetonem lub zmywaczem do paznokci i zacząć od nowa.
8. Wytrawianie - tradycyjnym rozwiązaniem jest tutaj kuweta z chlorkiem, przykładowo B327 (nadsiarczan sodowy) w ilości 100 g na 0,5 litra ciepłej (40 °C) wody. Warto zapewnić ruch w roztworze oraz utrzymywać temperaturę, przyspiesza to trawienie.
9. Konserwowanie - po wywierceniu wszystkich otworów i przylutowaniu elementów należy pokryć miedź ochronną warstwą. Utlenienie miedzi znacznie zmniejsza jej zdolność przewodzącą, co prowadzi z czasem do powstawania braków w połączeniach.

Główną zaletą tej metody jest jej dokładność (przykładowo ścieżki 10 mil i odstęp między nimi 8 mil). Zdjęcie płytki PCB zrealizowanej tą metodą jest na rysunku 3.1.

3.2 Oprogramowanie

3.2.1 Altium Designer 6

Altium Designer jest zintegrowanym systemem służącym do projektowania urządzeń elektronicznych. Wspiera szeroki zakres zadań stawianych przed konstruk-



Rysunek 3.1: Płytką PCB wykonana metodą fotolitografii

torem elektroniki, od schematów układów elektronicznych oraz PCB, poprzez programowanie układów FPGA i mikroprocesorowych, aż do symulacji i weryfikacji rozwiązania.

Altium Designer jest następcą wysoko cenionego w świecie elektroniki programu Protel. Jego popularność wpłynęła na dostępność bibliotek większości układów dostępnych na rynku.

Pierwszym etapem produkcji płytki jest dokładne zaprojektowanie wszystkich komponentów elektronicznych wraz z połączeniami między nimi. Bogata baza bibliotek zapewnia dostępność rysunków wielu układów i obudów, lecz w przypadku ich braku, edytor bibliotek pozwala na łatwe dodanie rysunku nowego elementu do bazy. Na tym etapie rysunki urządzeń są uproszczone, pokazując jedynie wyprowadzenia komponentów wraz z ich symbolami.

Kolejnym krokiem jest rysunek płytki PCB. Ten schemat konkretyzuje wszystkie parametry, które zostały pominięte na pierwszym etapie, mianowicie: ilość warstw i dokładny wymiar płytki PCB, fizyczne rozmieszczenie komponentów i położenie oraz grubość wszystkich ścieżek.

Program udostępnia funkcję automatycznego układania elementów na schemacie płytki, oraz algorytm automatycznego rozmieszczania ścieżek. Jednakże są to funkcje niedoskonałe i lepsze efekty można uzyskać ręcznie rozmieszczając elementy oraz większość ścieżek, używając tych funkcji jedynie do fragmentów schematu.

3.2.2 IAR Embedded Workbench for ARM

IAR Embedded Workbench to zestaw narzędzi niezbędnych dla programisty systemów wbudowanych. W skład zestawu wchodzi [6]:

1. Zintegrowane środowisko programistyczne (IDE).
 - hierarchiczna prezentacja projektów.
 - wiele projektów w jednym obszarze roboczym.
 - dokujące okna oraz wiele widoków.
 - przeglądarka kodów źródłowych.
 - narzędzia do tworzenia i edycji bibliotek
 - integracja z systemem kontroli kodów źródłowych
 - edytor tekstowy
 - szablony dla często używanych fragmentów kodu
 - narzędzia linii poleceń do kompilacji projektu
2. Kompilator IAR C/C++
 - zaawansowane opcje optymalizacji globalnej i specyficznej dla używanego mikrokontrolera, dla prędkości i zużytej pamięci
 - rozszerzona lista słów kluczowych, do definiowania danych/funkcji i deklarowania atrybutów funkcji lub pamięci
 - dyrektywy preprocesora do kontrolowania zachowania kompilatora, np. alokacji pamięci
 - funkcje bezpośredniego dostępu do niskopoziomowych rozkazów procesora z kodu w języku C
 - pełne wsparcie dla wszystkich atrybutów pamięci w C++
 - wsparcie dla przerwań i wyjątków w C i C++

3. IAR Assembler

- assembler z szerokim zestawem rozkazów i operatorów oraz makrami do relokacji
- wbudowany preprocesor, akceptujący definicje makr języka C

4. Konsolidator

- uniwersalne zarządzanie pamięcią pozwala na szczegółową kontrolę nad kodem programu i ulokowaniem danych
- usuwa nieużywane funkcje i zmienne
- sprawdzanie typów zmiennych języka C/C++ i funkcji całej aplikacji podczas konsolidowania
- opcjonalne generowanie sumy kontrolnej do weryfikacji podczas uruchamiania
- automatyczne umieszczanie kodu i danych w odpowiednim miejscu przy nie-ciągłym rozmieszczeniu

5. C-SPY Debugger

- W pełni zintegrowany debugger do usuwania błędów na poziomie źródła i dezasemblacji
- możliwość kontroli wykonania programu na bardzo dużym poziomie szczegółowości (krokowe wywoływanie funkcji)
- kompleksowe pułapki kodu i danych
- wszechstronny monitoring danych
- obsługiwane pojemniki STL
- okno stosu wywołań C/C++
- narzędzie Trace służące do badania historii wykonania
- symulacja przerwania i wejścia-wyjścia
- system makr podobnych do języka C do rozszerzenia funkcjonalności debugera
- narzędzia do analizowania pokrycia kodu oraz czasów wykonania funkcji

- podprogram do ładowania pamięci flash

Środowisko zawiera również wiele dodatkowych cech i zalet.

- wsparcie dla systemów czasu rzeczywistego (w tym wsparcie dla interfejsu ORTI)
- gotowe pliki C/C++ oraz assemblerowe z konfiguracją początkową dla każdego obsługiwanego układu
- wiele programów przykładowych dla szerokiej gamy mikrokontrolerów oraz płytek ewaluacyjnych (w tym do płytki Olimex LPC-P2378)
- załączone wszystkie biblioteki ISO/ANSI C i C++ wraz ze źródłami
- język C o standardzie ISO/ANSI C94 z niektórymi funkcjami C99

Firma IAR oprócz komercyjnych wersji swojego środowiska programistycznego udostępnia również dwie darmowe edycje oprogramowania. Jest to w pełni funkcjonalna wersja 30-dniowa oraz wersja Kickstart Edition, która ma ograniczenie do 32 kB kodu.

Głównym kryterium doboru środowiska programistycznego była bezproblemowa obsługa posiadanego sprzętu. IAR Embedded Workbench for ARM jest w pełni kompatybilny z programatorem JTAG-ARM typu Wiggler oraz zawiera szeroką gamę przykładów dla płytki prototypowej LPC-P2378 co znacznie przyspiesza pracę nad oprogramowaniem.

Rozdział 4

Realizacja prototypu

Pierwszym krokiem podczas realizacji projektu było zdobycie jak największej ilości informacji o dotychczasowym sprzęgu. Niestety interfejs między czujnikiem, a jego kontrolerem tej samej firmy był informacją zastrzeżoną. Udało się uzyskać pewne dane [2] od obsługi klienta firmy ATI Industrial Automation, niestety dopiero po skończeniu pracy nad prototypem. Szczęśliwie pokrywały się one z dotychczasową wiedzą.

W takich przypadkach przychodzi z pomocą inżynieria wsteczna (ang. reverse engineering). Na początku zatem starano się zbadać dokładnie linie sprzęgu analizując przebieg ścieżek oraz sposób podłączenia wszystkich układów w dotychczasowym kontrolerze czujnika sił i momentów sił. Płytką PCB kontrolera jest trójwarstwowa, przez co nie wszystko można było sprawdzić wizualnie, lecz przy pomocy multimetru można ustalić, czy połączenie między dwoma punktami faktycznie istnieje.

Kolejnym krokiem jest przeanalizowanie przebiegów czasowych oraz poziomów napięć przy pomocy oscyloskopu, dopełniając tym samym obraz działającego kontrolera.

Zdecydowano się zaprojektować nowy sprzęg czujnika, a zwłaszcza kluczowych elementów, odpowiedzialny za przetwarzanie analogowego odczytu z czujnika na jego wartość cyfrową, w sposób identyczny ze sposobem działania istniejącego kontrolera. Taka metoda postępowania zapewnia największe prawdopodobieństwo poprawnego działania nowego sprzęgu w najkrótszym czasie.

Do zaprojektowania nowej płytki interfejsu użyto zestawu narzędzi Altium

Designer 6. Za pomocą tego oprogramowania został narysowany schemat elektroniczny, a następnie rysunek płytki drukowanej, który został użyty do jej realizacji za pomocą metody fotolitografii. Do zaprogramowania mikrokontrolera został użyty program IAR Embedded Workbench for ARM Kickstart Edition. Płytkę prototypową wraz z płytką interfejsu czujnika oraz programatorem ARM-JTAG typu Wiggler firmy Olimex zamknięto w plastikowej obudowie. Na zewnątrz zostały wyprowadzone interfejsy Ethernet, RS-232 oraz złącze LPT programatora.

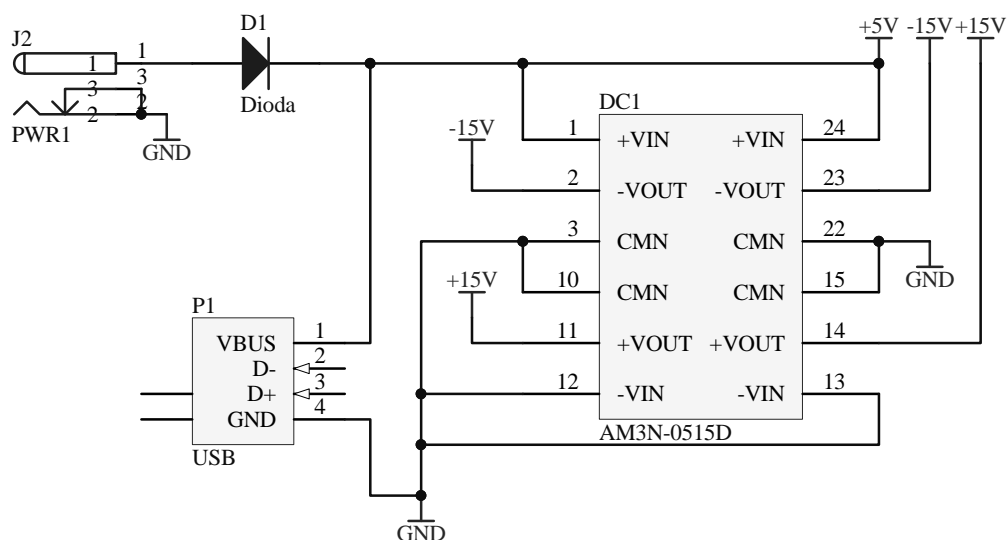
4.1 Projekt elektroniczny nowego interfejsu czujnika

Założeniem projektu było zrealizowanie sprzęgu czujnika zapewniającego szybkie odczyty jak najlepszej jakości oraz wyposażenie go w nowe interfejsy ułatwiające komunikację z komputerem PC. Najważniejszym interfejsem, który ma w przyszłości zastąpić obecne rozwiązanie jest interfejs Ethernet. Zdecydowano się urządzenie oprzeć na płytce prototypowej LPC-P2378 posiadającej mikrokontroler wraz z niezbędnym otoczeniem i złączami. Do niej za pomocą taśmy 40-żyłowej podłączono wykonaną płytkę zawierającą niezbędne elementy sprzęgu czujnika siły i momentów sił.

4.1.1 Schemat elektroniczny

Schemat zasilania

Założeniem było użycie pojedynczego zasilania, dla całego urządzenia oraz czujnika siły i momentów sił. Kupiono więc zasilacz firmy Siemens o oznaczeniu ADC59200G, o parametrach wyjściowych DC 5.9V 2A. Zapewnia on zasilanie obydwu płytek oraz czujnika. Spadek napięcia do akceptowalnego zapewniono za pomocą pojedynczej diody prostowniczej o spadku napięcia 0.7V. W przypadku potrzeby zmiany źródła zasilania na 5V wystarczy zastąpić diodę zwykłym połączeniem. Na rysunku 4.1 znajduje się fragment schematu, na którym znajduje się projekt zasilania. Do gniazda J2 podłączany jest zasilacz. Umieszczona tuż za nim dioda prostownicza zapobiega skutkom odwrotnego podłączenia biegunów zasilania oraz zapewnia spadek napięcia do około 5,2-5,3 V, które zasila wszystkie układy wymagające takiej poziomu oraz całą płytkę prototypową LPC-P2378. Płytkę tą można zasilać na 3 sposoby: JLINK, USB, oraz zewnętrzny zasilacz 9V. Najprostszym sposobem okazało się dolutowanie zasilania do styków portu USB, ze względu na poziomy napięć tego interfejsu (5V). Zasilanie czujnika oraz niektó-



Rysunek 4.1: Schemat zasilania nowego sprzęgu.

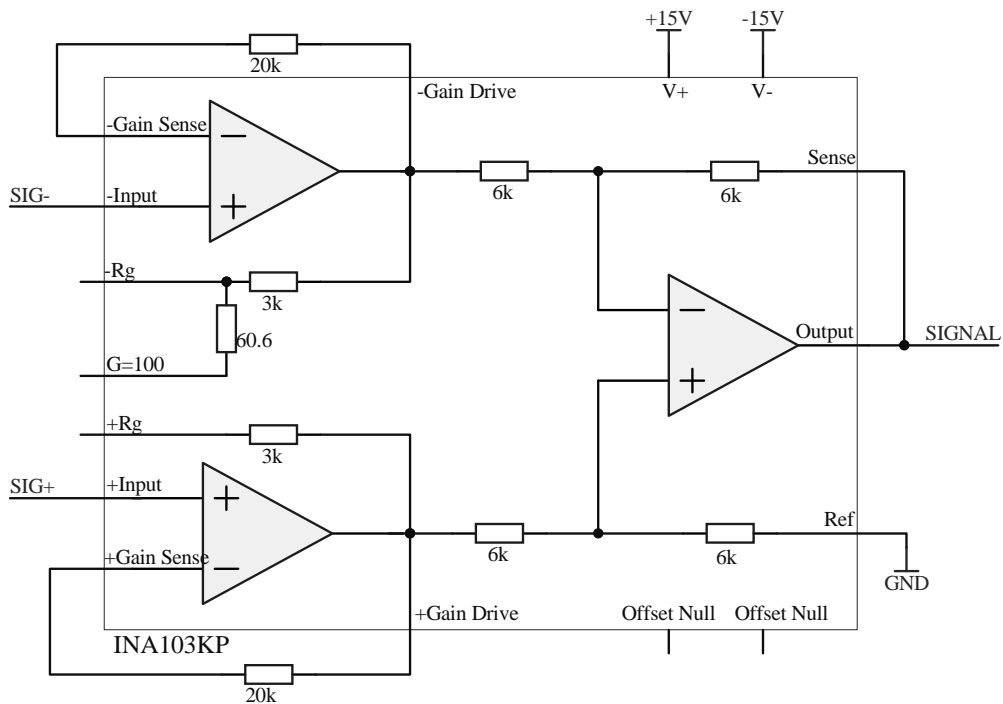
rych układów elektronicznych wymaga poziomów napięć -15V i $+15\text{V}$. Poziomy te osiągnięto stosując przetwornicę DC/DC AM3N-0515D, o maksymalnym prądzie wyjściowym 200mA dla obu wyjść.

Analogowy odczyt z czujnika.

Sygnal analogowy, którym przesyłane są odczyty z czujnika jest sygnałem różnicowym. Oznacza to, że jest on przesyłany za pomocą dwóch linii, a informacja jest zakodowana jako różnica między poziomami napięć na tych liniach. Jest to stosowane, aby zniwelować wpływ zakłóceń otoczenia na jakość informacji. Założenie jest takie, że jeżeli coś powoduje zaburzenia elektromagnetyczne, to wpływa na obydwie linie jednakowo, zatem różnica między poziomami się nie zmienia.

Taki sygnał można podzielić na część sumacyjną i różnicową. Zadaniem wzmacniacza różnicowego jest zamiana symetrycznego wejścia sygnału na niesymetryczne wyjście, przynosząc część różnicową. Miarą jakości takiego wzmacniacza jest współczynnik CMRR (Common Mode Rejection Ratio), który odzwierciedla tendencję do tłumienia części sumacyjnej sygnału [5].

Układ INA103KP firmy Burr Brown jest wysokiej jakości wzmacniaczem róż-

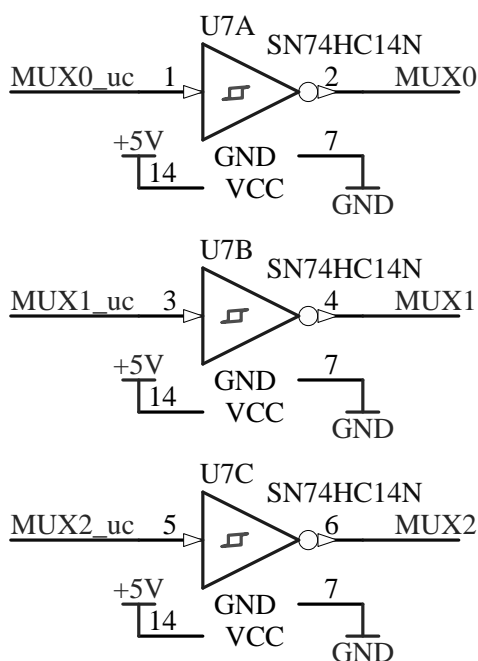


Rysunek 4.2: Schemat podłączenia wzmacniacza różnicowego.

nicowym stosowanym od lat w profesjonalnych zastosowaniach, najczęściej audio-filskich. INA103 jest układem o wysokim parametrze $CMRR > 100dB$ [3]. W jego skład wchodzi trzy wzmacniacze operacyjne. Dzięki wzmacniaczom na wejściach, działających jako wtórnik, otrzymujemy układ o bardzo dużej impedancji wejściowej, przez co nie obciąża się źródła sygnału. Rysunek 4.2 przedstawia sposób podłączenia sygnałów do wzmacniacza. Linie SIG+ i SIG- pochodzą z czujnika, natomiast etykieta SIGNAL jest oznaczeniem wyjścia wzmacniacza, które jest podłączone bezpośrednio do wejścia przetwornika analogowo-cyfrowego.

Linie wyboru wyjścia czujnika.

Linie MUX0, MUX1 i MUX2 służą do wyboru sygnału, który ma być przesyłany z czujnika. Poziomy napięcie to 0-5V. Wyjścia mikrokontrolera LPC-2378 działają na poziomach napięć 0-3.3V. Aby dostosować wysokość napięcia do oczekiwanego przez czujnik, jak również aby odseparować mikrokontroler od bezpośredniego wpływu czujnika zastosowano inwertery Schmita w popularnym układzie SN74HC14. Zapewniają one konwersję napięcia, oraz dodatkową stabilizację przełączania stanów. Sposób podłączenia przedstawiony jest na rysunku 4.3, na któ-



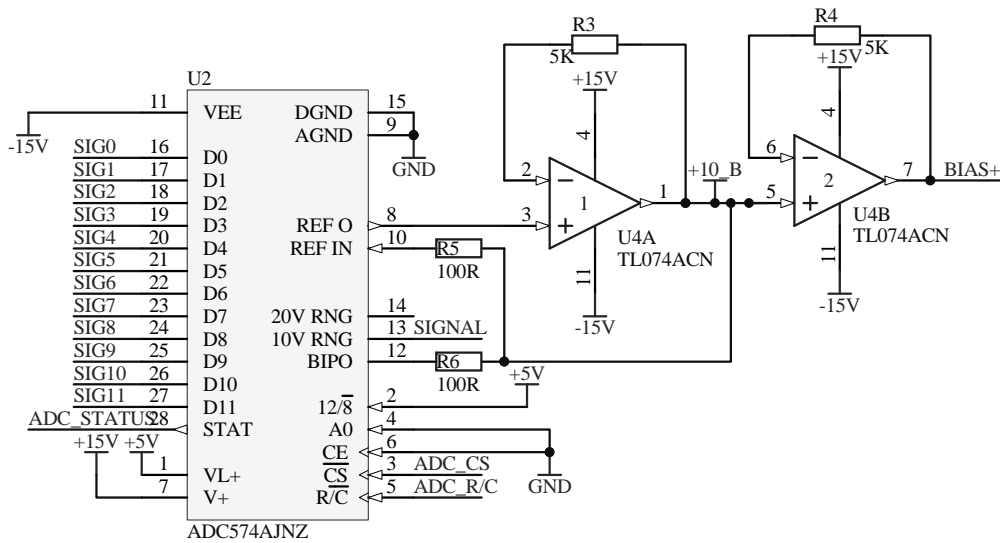
Rysunek 4.3: Schemat podłączenia linii MUXn.

rym po lewej są wyjścia mikrokontrolera (MUXn_uc), natomiast po prawej wejścia czujnika (MUXn).

Przetwornik ADC.

Schemat 4.4 przedstawia podłączenie przetwornika Analog Devices AD574A do układu. Jest to odpowiednik przetwornika o tym samym oznaczeniu, zastosowanego w dotychczasowym kontrolerze czujnika. Jest to przetwornik 12-bitowy z sukcesywną aproksymacją, z wyjściem trójstanowym do bezpośredniego podłączenia lub do magistrali 8- albo 16-bitowej [4].

Układ na wyjściu ReferenceOut generuje poziom napięcia 10V z dużą dokładnością. Poziom ten jest przesyłany do czujnika na linii BIAS+ oraz używany pośrednio do generowania sygnałów SG+ i SG-. Mikrokontroler steruje przetwornikiem za pomocą połączeń o etykietach ADC_CS oraz ADC_R/C. Pierwsza linia służy do włączenia przetwornika, druga zaś jest używana do włączenia jednego z dwóch trybów. Podczas trybu Convert przetwornik konwertuje sygnał analogowy na cyfrowy, natomiast tryb Read służy do odczytania cyfrowej wartości przez mikrokontroler. Sygnał analogowy danych z wyjścia wzmacniacza różnicowego ma oznaczenie SIGNAL. Przetworzone dane są wystawiane na wyjściach SIG0-SIG11.



Rysunek 4.4: Schemat podłączenia przetwornika A/C AD574A

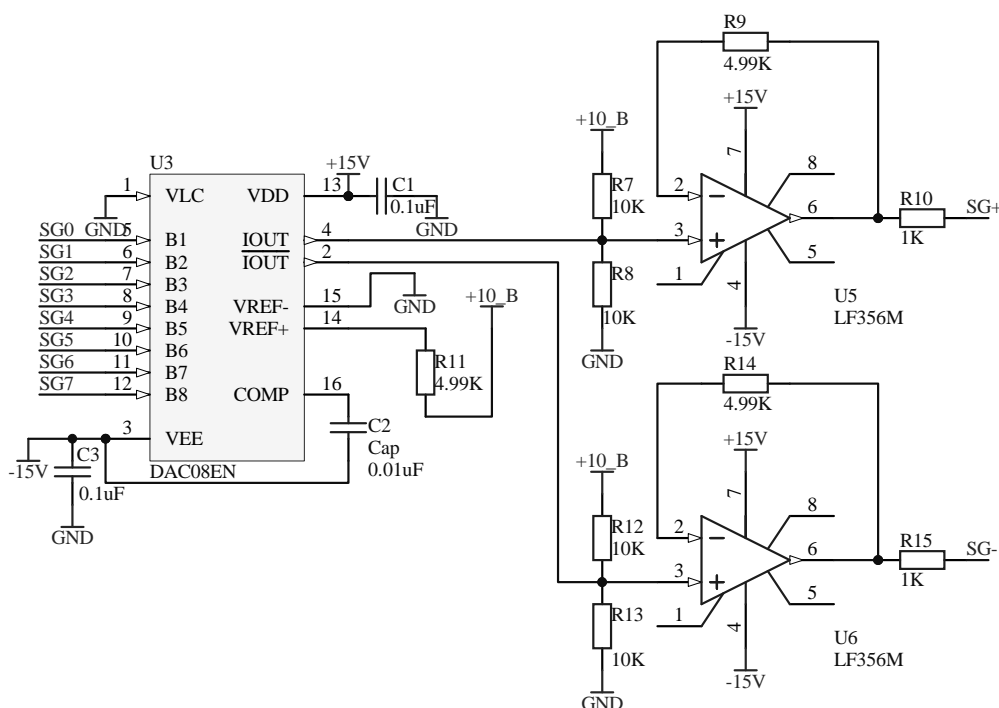
Gotowość danych jest sygnalizowana poziomem niskim na linii STATUS.

Zasilanie tensometrów

Zgodnie z zaleceniami firmy ATI Industrial Automation [2] oraz ze sposobem ich realizacji w ich kontrolerze, należy generować sygnał zasilania +5V tensometrów z dużą dokładnością. W tym celu użyto przetwornika cyfrowo-analogowego DAC08EN gwarantującego dokładność do 0.5%. Jest on odpowiednikiem układu DAC0800 użytego przez producenta. Sygnał +10_B z przetwornika analogowo-cyfrowego AD574A jest używany jako sygnał referencyjny, aby otrzymać pełną dokładność. Generowany sygnał zasilania tensometrów jest przesyłany za pomocą linii sprzęgu czujnika SG+ i SG-. Schemat podłączenia znajduje się na rysunku 4.5.

Połączenie płytek.

Płytkę prototypową LPC-P2378 sprzęgnięto z wykonaną płytką za pomocą złącza EXT1, służącego do podłączenia taśmy 40-pinowej. Rysunek 4.6 przedstawia definicje linii od strony mikrokontrolera oraz płytki sprzęgu czujnika.



Rysunek 4.5: Schemat układu generującego sygnały SG+ i SG-

4.1.2 Schemat płytki drukowanej

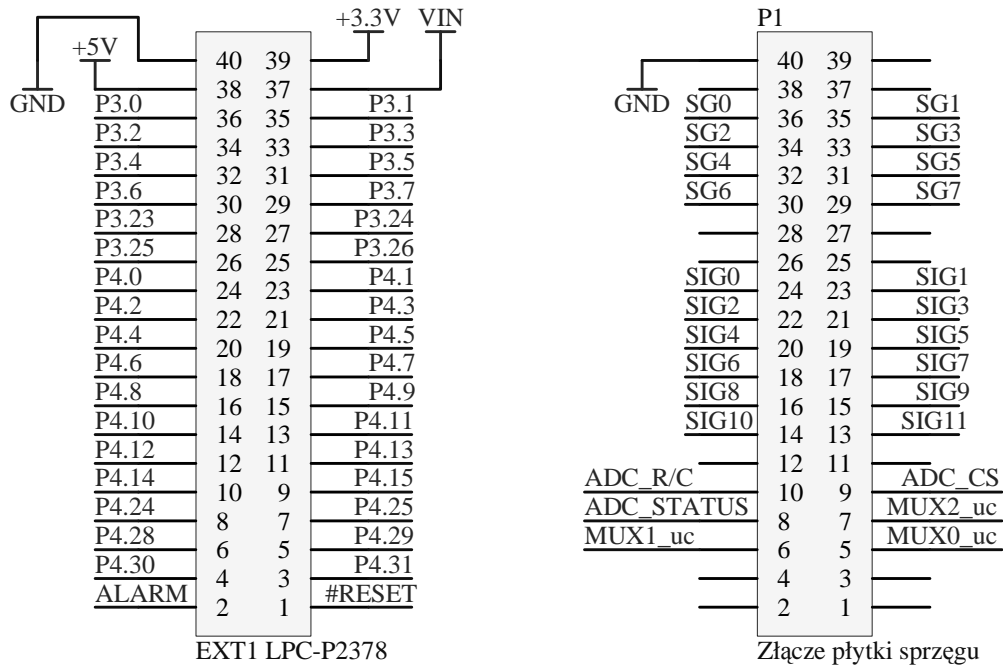
Płytką drukowaną nowego sprzęgu jest dwuwarstwowa. Na warstwie górnej zostały umieszczone jedynie linie odpowiedzialne za zasilanie wszystkich elementów. Warstwa dolna zawiera pozostałe ścieżki. Rysunki 4.7 oraz 4.8 przedstawiają schematy warstw zrealizowanej płytki drukowanej.

4.2 Oprogramowanie mikrokontrolera

Oprogramowanie mikrokontrolera zostało napisane prawie w całości w języku C, oprócz pliku startowego napisanego w assemblerze. Kod źródłowy został podzielony na pliki ze względu na pełnione funkcje.

cstartup.s - startowy plik assemblerowy zawierający podstawowe definicje niezbędne podczas uruchamiania mikrokontrolera, takie jak adresy wektorów przerwań. Na końcu znajduje się odwołanie do funkcji main().

irq.c, irq.h - pliki zawierające funkcje służące do obsługi przerwań.



Rysunek 4.6: Złącza taśmy łączącej płytki.

fio.c, fio.h - tu znajdują się funkcje odpowiedzialne za obsługę szybkich portów we-wy.

target.c, target.h - zawierają funkcje potrzebne do inicjalizacji mikrokontrolera, urządzeń peryferyjnych, pętli PLL.

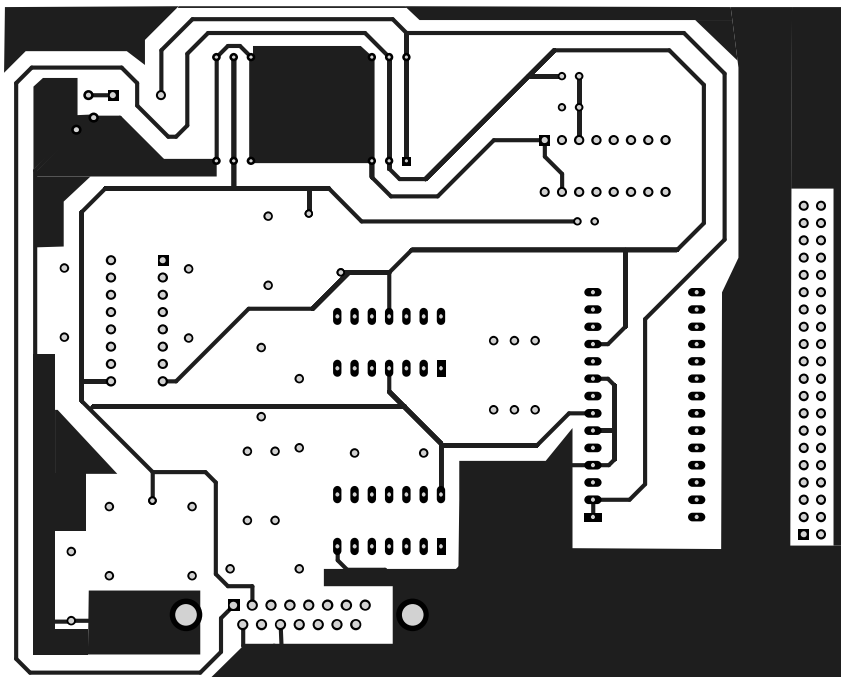
timer.c, timer.h - obsługa czasomierzy mikrokontrolera.

uart.c, uart.h - funkcje ułatwiające używanie portów UART mikrokontrolera.

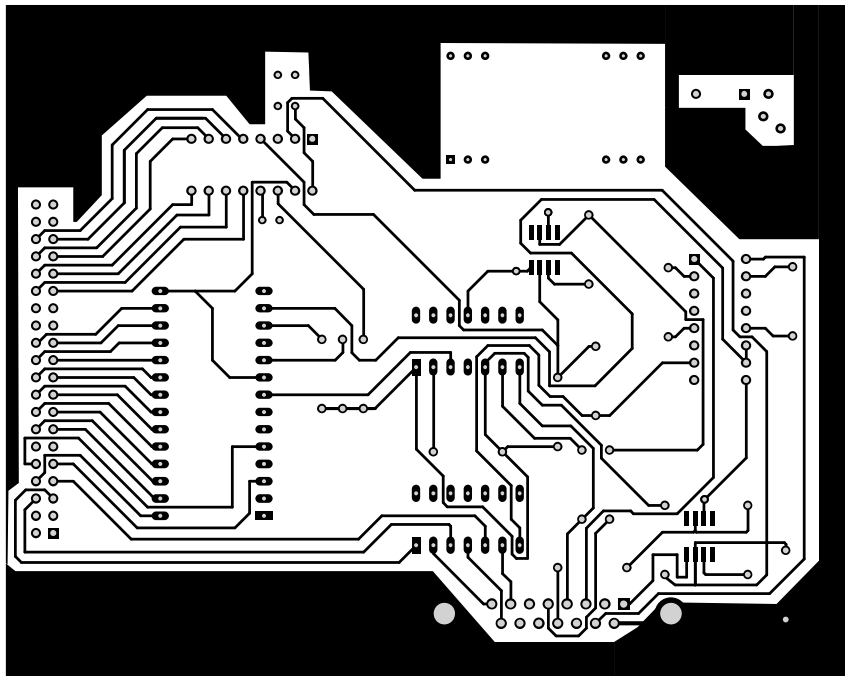
ft3084.c, ft3084.h - zawiera wszystkie funkcje potrzebne do inicjalizacji oraz używania wszystkich elementów sprzęgu: DAC, ADC, portów we-wy. Ponadto znajduje się tu funkcja `strainGage2FTxyz()` służąca do obliczenia zmierzonych sił i momentów sił, korzystając z odczytów z tensometrów oraz tablicy kalibracyjnej.

main.c - plik zawiera kod odpowiedzialny za początkową konfigurację oraz główną pętlę programu.

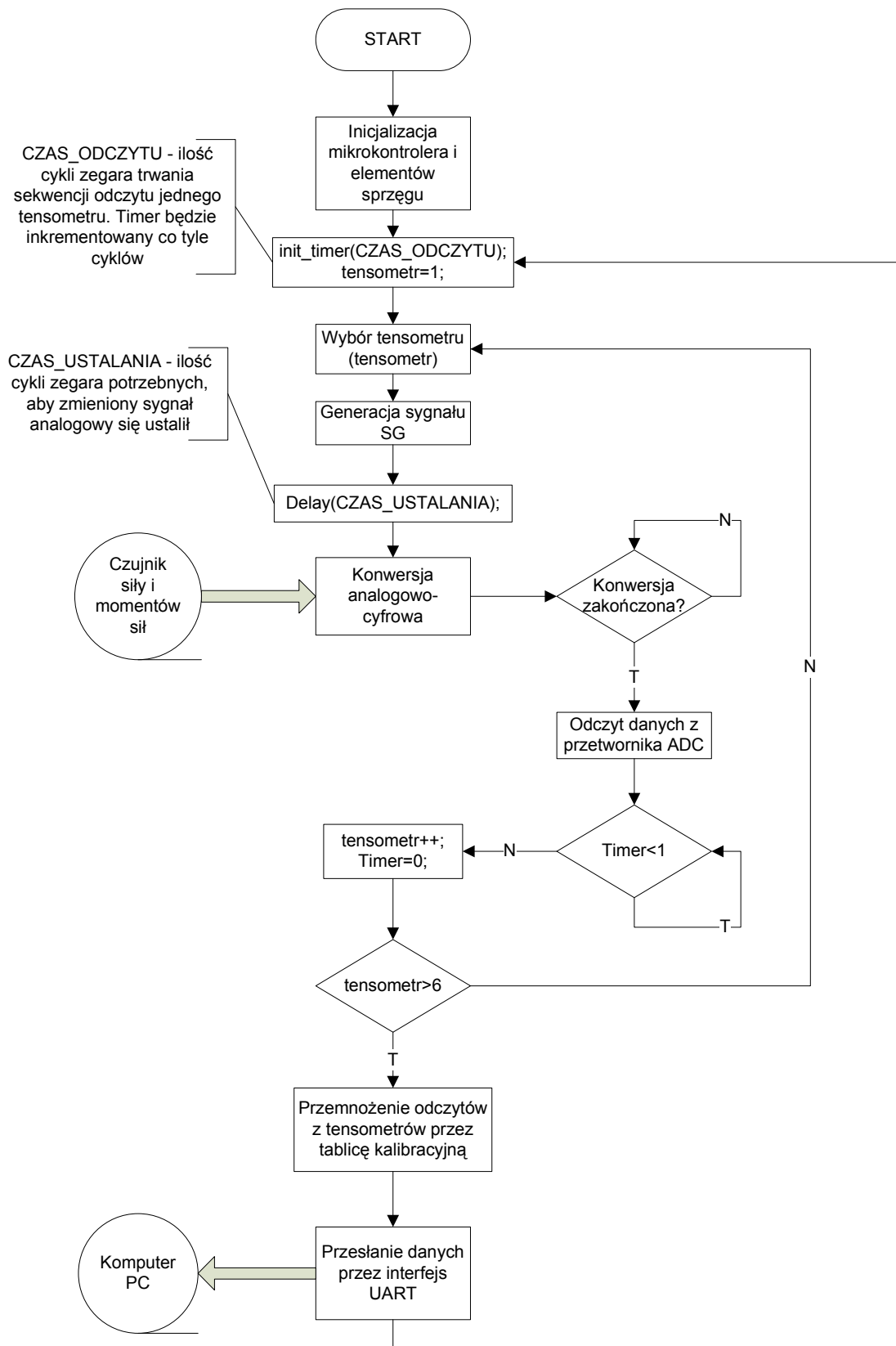
iolpc2378.h - definicje wszystkich adresów we-wy używanego mikrokontrolera.



Rysunek 4.7: Warstwa górna płytki interfejsu elektronicznego czujnika



Rysunek 4.8: Warstwa dolna płytki interfejsu elektronicznego czujnika



Rysunek 4.9: Algorytm działania nowego sprzęgu czujnika.

type.h - definicje podstawowych typów danych.

Plik main.c zawiera główną pętlę programu. Algorytm zgodnie z którym działa znajduje się na rysunku 4.9. Poniżej zamieszczone jest wyjaśnienie poszczególnych kroków:

Inicjalizacja mikrokontrolera i elementów sprzęgu - Krok ten zawiera w sobie podstawową konfigurację mikrokontrolera (cstartup.s), jak również inicjalizację wszystkich urządzeń peryferyjnych, portów, pętli PLL oraz uruchomienie układów na nowej płytce sprzęgu.

init_timer(CZAS_ODCZYTU); - uruchomienie czasomierza, zliczającego cykle zegara, inkrementując zmienną Timer co podaną liczbę cykli.

tensometr=1; Ustawienie zmiennej wskazującej na aktualnie odczytywany tensometr.

Wybór tensometru (tensometr) - ustawienie linii MUXn w taki sposób, aby czujnik zaczął wysyłać odpowiadające mu odczyty.

Generacja sygnału SG - Sygnał SG jest impulsem prostokątnym o wysokości $\pm 5V$, który jest wysyłany tuż po zmianie na liniach MUXn.

Delay(CZAS_USTALANIA); - Po zmianie wyjścia czujnika należy odczekać chwilę, aby sygnał zdążył się ustalić. CZAS_USTALANIA dobrany eksperymentalnie.

Konwersja analogowo-cyfrowa - Przełączenie przetwornika analogowo-cyfrowego w tryb konwersji.

Konwersja zakończona? - Zakończenie przetwarzania analogowego sygnału na jego wartość cyfrową jest sygnalizowane poziomem niskim na linii STATUS przetwornika A/C.

Odczyt danych z przetwornika ADC - Po przełączeniu przetwornika A/C w tryb odczytu na jego wyjściach pojawia się wartość cyfrowa sygnału, którą można odczytać.

Timer<1 - oczekiwanie na odliczenie czasu, który ma trwać jeden cykl odczytu danych z czujnika. Wprowadzono takie ograniczenie, aby odczyty trwały dokładnie tyle czasu, co w starym kontrolerze czujnika.

tensometr++; - przełączenie zmiennej na następny tensometr.

Timer=0; - zresetowanie czasomierza.

tensometr>6 - w czujniku znajduje się sześć tensometrów, więc po odczytaniu wszystkich, należy zakończyć proces odczytywania danych.

Przemnożenie odczytów z tensometrów przez tablicę kalibracyjną - krok, w którym otrzymujemy wyniki odczytu sił i momentów sił.

Przesłanie danych przez interfejs UART - przetworzone dane są wysyłane do komputera PC poprzez interfejs UART.

4.3 Obudowa

Płytkę prototypową, nową płytkę sprzęgu czujnika oraz programator/debugger JTAG zamknięto w czarnej, plastikowej obudowie. Z przodu obudowy znajduje się główny włącznik urządzenia oraz złącze D-Sub 15, służące do podłączenia czujnika. Tył obudowy zawiera gniazdo zasilacza, złącze LPT programatora JTAG, złącze UART D-Sub 12 oraz złącze Ethernet.

Znajduje się tam również zakryte zaślepką złącze USB. Zostało tam umieszczone jedynie w celach diagnostycznych i nie wolno go używać ze względu na dolutowane do gniazda zasilanie płytki prototypowej.

Rozdział 5

Podsumowanie

5.1 Testy

W celu weryfikacji zrealizowanego rozwiązania została przeprowadzona seria testów. Ich intencją było sprawdzenie poprawności funkcjonowania czujnika z nowym interfejsem oraz wstępna ocena otrzymanych wyników pomiarów.

Nie wydało się celowe dokładne badanie parametrów oraz liniowości pomiarów, podobnie jak wpływu temperatury na odczyty. Jest to bardzo czasochłonne, a oceniono to jako mało korzystne i wartościowe dla obecnych zastosowań czujnika.

5.1.1 Sposób przeprowadzenia

Do testów użyto odważników 0,5 kg, 1 kg i 2 kg, a podczas badania momentów siły, aluminiowego pręta o długości 110 cm mocowanego na chwytaku manipulatora IRp-6.

Wprowadzono modyfikacje oprogramowania mikrokontrolera w celu ułatwienia testów. Polegały one na sterowaniu przepływem informacji oraz obliczeniami za pomocą dwóch przycisków płytki prototypowej: pierwszy przycisk wprowadzał przesunięcie odczytów z tensometrów o aktualny pomiar (powodowało to zerowanie odczytów), drugi zaś inicjował wysłanie pojedynczego, aktualnego pomiaru przez interfejs RS232.

W celu zbadania poszczególnych składowych sił końcówka manipulatora była ustawiana w jednej z trzech pozycji zapewniających oddziaływanie siły ciężkości obciążenia na czujnik w kierunkach zgodnych z osiami X, Y oraz Z. Następnie

przesuwane były odczyty tensometrów do wartości zerowej, aby usunąć wpływ niepożądanych sił (np. ciężaru zamocowanego chwytaka). Na końcu manipulatora umieszczane były kolejno obciążenia, po czym odczyty były przesyłane na komputer PC.

Podczas badania składowych momentów sił do chwytaka manipulatora zamocowano pręt. Dokładanie obciążenia na końcu tak skonstruowanej struktury skutkowało wytworzeniem momentu siły wokół osi Z czujnika. Pomiarów momentów siły wokół osi X oraz Y okazały się bardzo problematyczne. Głównym problemem jest mocowanie pręta do chwytaka robota. W przypadku osi Z można dobrze zamocować pręt dzięki specyficznej, "płaskiej" budowie chwytaka, natomiast dla innych osi wymagało by to stworzenia specjalnej konstrukcji zastępującej chwytak i mocowanej bezpośrednio do czujnika siły. Po pomyślnej weryfikacji pomiarów składowych sił oraz momentu siły wokół osi Z zdecydowano się zrezygnować z dalszych testów.

W celu zobrazowania ustawień manipulatora podczas przeprowadzania testów umieszczono cztery rysunki poglądowe.

Rysunek 5.1 - Badanie wpływu obciążenia na pomiar siły F_z

Rysunek 5.2 - Badanie wpływu obciążenia na pomiar siły F_x

Rysunek 5.3 - Badanie wpływu obciążenia na pomiar siły F_y

Rysunek 5.4 - Badanie wpływu obciążenia na pomiar momentu siły T_z

5.1.2 Wyniki

Odczyty zwracane przez czujnik są podawane w jednostkach, które nie są jednostkami systemu metrycznego. W tym celu należy przemnożyć uzyskane wyniki przez parametry kalibracyjne, inne dla sił i momentów sił. Parametry te zostały obliczone podczas badania obciążenia 1 kg dla sił i 0.5 kg w przypadku momentów sił i wynoszą:

$$p_f = \frac{10}{115} \text{ - dla sił,}$$

$$p_t = \frac{5}{940} \text{ - dla momentów sił.}$$

Podczas analizowania wyników warto mieć na uwadze dwie rzeczy. Po pierwsze, czujnik sił i momentów sił nie jest urządzeniem doskonałym i jego pomiary są obarczone błędami. Po drugie, w praktyce jest niezwykle trudne stworzenie takiego stanowiska eksperymentalnego, w którym można zapewnić działanie na czujnik

siły tylko w jednej wybranej osi. W idealnym przypadku obciążenie powinno być punktowe oraz mocowane bezpośrednio do czujnika siły, a nie do chwytaka.

Obciążenie	F _x	F _y	F _z	T _x	T _y	T _z
	N			Nm		
0 kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5 kg	-4.78	-0.43	0.00	0.02	-0.68	0.00
1 kg	-10.00	-1.04	-0.17	0.03	-1.28	-0.03
2 kg	-20.09	-3.13	-0.09	0.05	-2.36	-0.09
3 kg	-30.00	-3.04	0.00	0.08	-3.43	-0.02

Tabela 5.1: Badanie wpływu obciążenia wzdłuż osi X

Tabela 5.1 przedstawia pomiary sił podczas obciążania czujnika w ustawieniu z rysunku 5.2. Jak widać, zwiększanie siły działającej na chwytak w osi X powoduje również wytworzenie momentu siły wokół osi Y. Jest to spowodowane tym, że obciążenie znajduje się na chwytaku, w pewnej odległości od czujnika. Zwiększanie się siły F_y jest również niezamierzonym efektem, lecz jest ona akceptowalnie mała w porównaniu z obserwowaną wartością F_x.

Obciążenie	F _x	F _y	F _z	T _x	T _y	T _z
	N			Nm		
0 kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5 kg	0.09	-5.30	-0.09	0.44	0.02	0.01
1 kg	0.17	-10.96	-0.43	0.99	0.03	0.02
2 kg	0.52	-21.56	-1.65	1.86	0.04	-0.05
3 kg	0.78	-32.16	-1.22	2.78	0.11	0.01

Tabela 5.2: Badanie wpływu obciążenia wzdłuż osi Y

Tabela 5.2 obrazuje z kolei jak zmieniają się mierzone wartości podczas ustawienia manipulatora w pozycji 5.3. Widać tu podobne efekty jak w poprzedniej tabeli, czyli wpływ siły działającej na osi Y na moment wokół prostopadłej osi X.

Pomiary wzdłuż osi Z, w tabeli 5.3 są najdokładniejsze z uwagi na możliwość stworzenia warunków pomiarowych najbardziej zbliżonych do idealnych. Siła ciężkości obciążenia działa bezpośrednio na znajdujący się pod nim czujnik, nie ingerując w pomiary wzdłuż lub wokół innych osi.

Pomiary znajdujące się w tabeli 5.4 były trudne do przeprowadzenia ze względu na konieczność zapewnienia dokładnego ramienia siły. Obciążenie o wartości 0.5 kg montowane na pręcie o długości 1 m wytwarza moment siły o wartości 5

Obciążenie	F _x	F _y	F _z	T _x	T _y	T _z
	N			Nm		
0 kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5 kg	0.17	0.00	-5.22	0.01	-0.01	0.00
1 kg	0.09	-0.17	-10.09	0.09	-0.08	0.00
2 kg	0.00	0.00	-20.35	0.06	0.06	0.00
3 kg	0.00	0.00	-30.09	0.06	0.07	0.00

Tabela 5.3: Badanie wpływu obciążenia wzdłuż osi Z

Obciążenie	F _x	F _y	F _z	T _x	T _y	T _z
	N			Nm		
0 kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25 kg	0.00	-2.52	0.26	0.25	0.05	-2.58
0.5 kg	0.17	-4.96	1.30	0.52	0.06	-5.00

Tabela 5.4: Badanie wpływu obciążenia na moment siły wokół osi Z

Nm, co jest maksymalnym zakresem pomiarowym momentów sił czujnika ATI-IA. Ostatecznie uzyskano dwa pomiary na podstawie których oszacowano parametr kalibracyjny dla momentów sił.

5.2 Perspektywy rozwoju

Niniejsza praca jest wstępem do docelowego rozwiązania. Możliwości jakie daje opracowanie nowego sprzęgu są duże. W trakcie pisania tego akapitu wciąż trwają prace nad protokołem, który ma posłużyć do komunikacji z czujnikami w Laboratorium Robotyki poprzez interfejs Ethernet. Użyta płytki prototypowa posiada również interfejs CAN, który z powodzeniem jest wykorzystywany w sieciach przemysłowych do komunikacji z urządzeniami elektronicznymi.

Dzięki małym rozmiarom urządzenia, istnieje możliwość zamontowania sprzęgu w pobliżu czujnika, na manipulatorze IRp-6.

Możliwa jest też korekta pomiarów siły przy pomocy montowanych w pobliżu czujników siły akcelerometrów. Istnieje możliwość dołączenia tych akcelerometrów do użytej płytki prototypowej, co skutkowałoby kompleksowym rozwiązaniem sprzęgu skorygowanych pomiarów sił z komputerem PC i używaną strukturą ramową MRROC++.

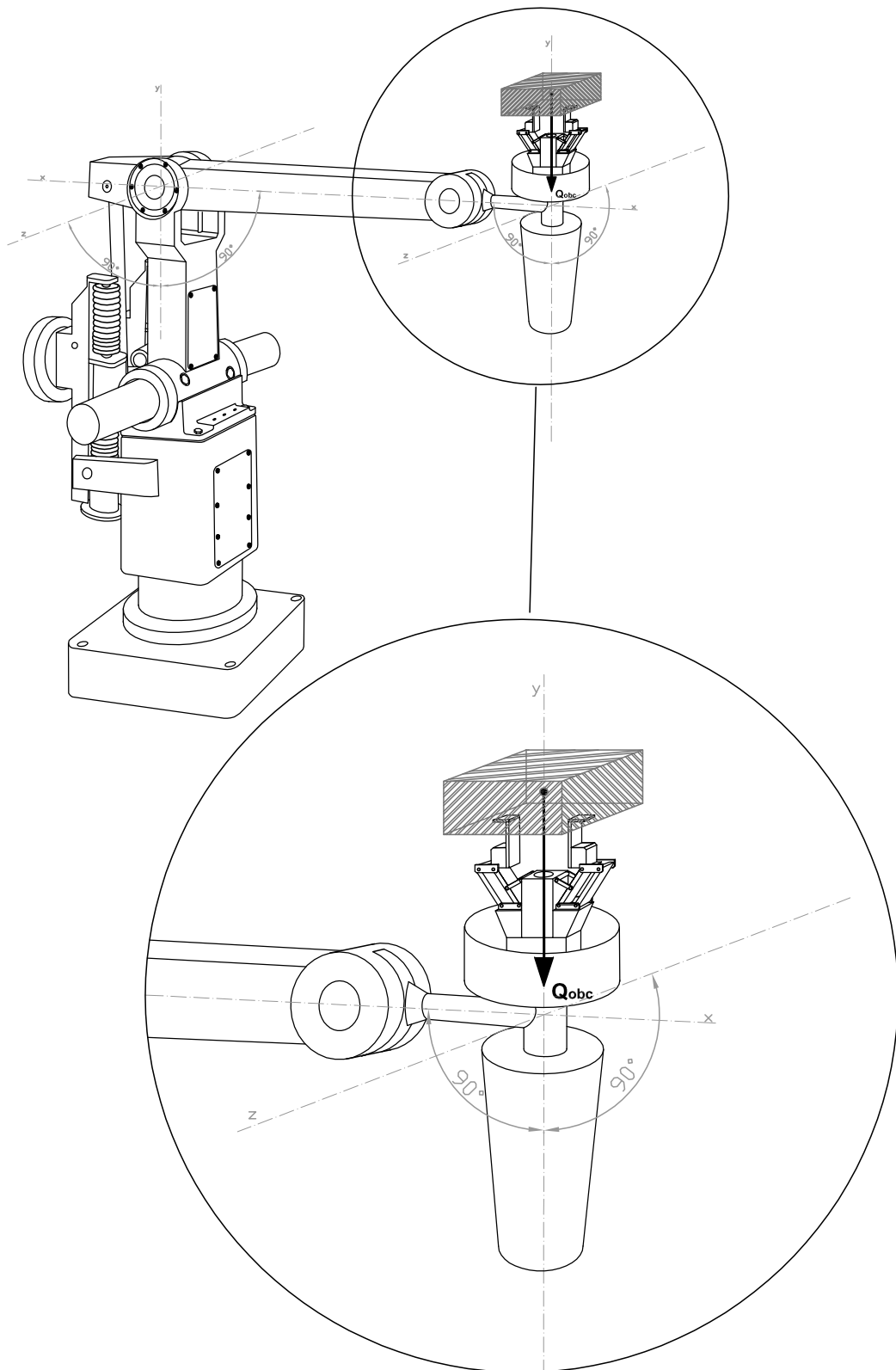
5.3 Wnioski

Podejście, które zostało zastosowane do zaprojektowania sprzęgu zaowocowało nowym kontrolerem czujnika siły. W stosunkowo krótkim czasie, udało się uzyskać rozwiązanie nie ustępujące staremu pod względem jakości i szybkości. Złożyło się na to kilka czynników.

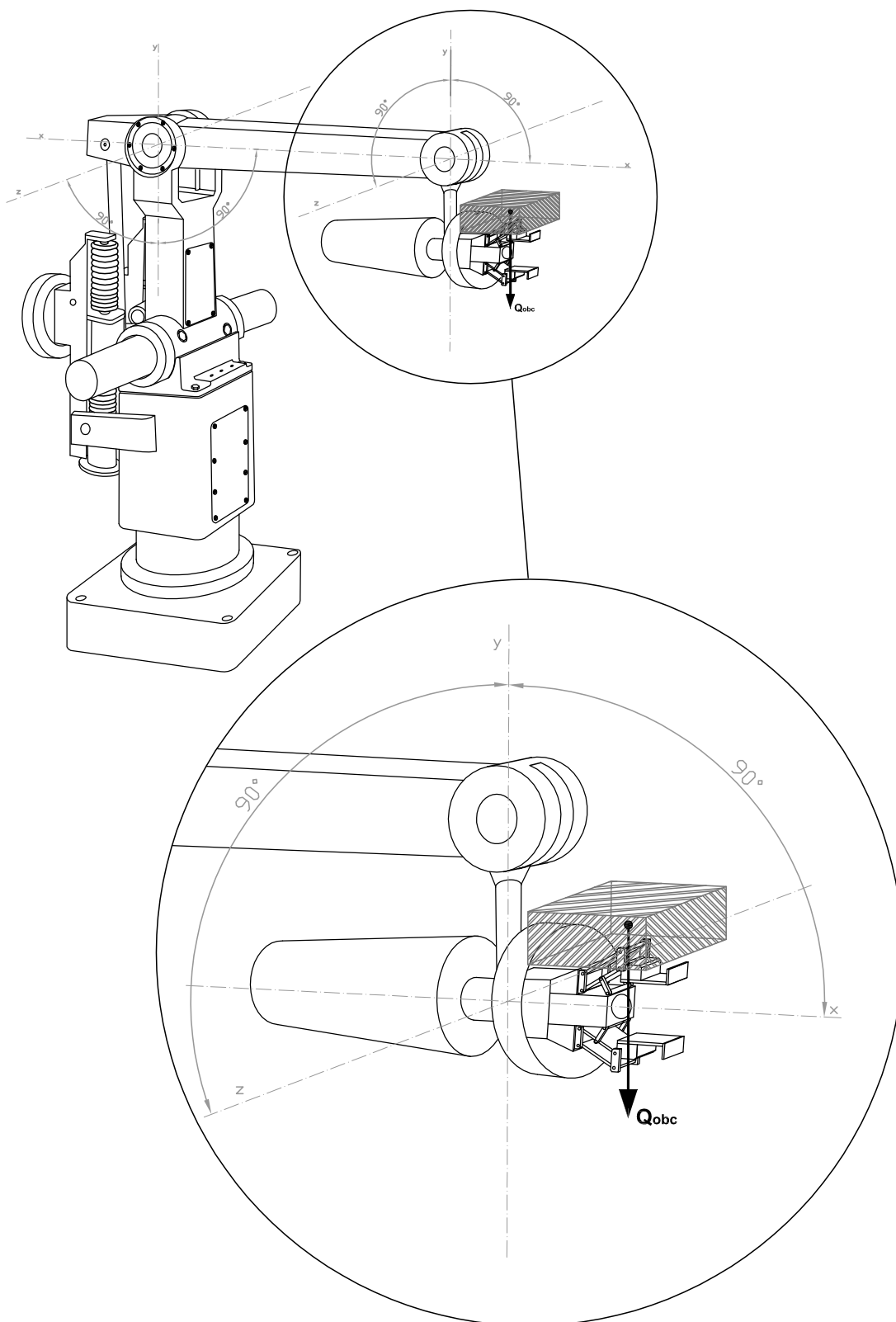
Po pierwsze, zastosowanie gotowej płytki prototypowej, zamiast projektowania własnej z mikrokontrolerem, pozwoliło uniknąć potencjalnych błędów podczas jej planowania i przyspieszyło pracę. Użycie dostępnego w sprzedaży modułu jest również wartościowe z uwagi na łatwość wymiany w przypadku awarii, bądź potrzeby modernizacji.

Kolejną zaletą jest zaprojektowanie interfejsu czujnika z mikrokontrolerem, na zasadzie zrozumienia i skopiowania obecnego rozwiązania. Jest to zalecane podejście w przypadku realizacji interfejsów, do których brak specyfikacji. Dzięki niemu można w krótkim czasie uzyskać rozwiązanie poprawne, bo już sprawdzone i używane.

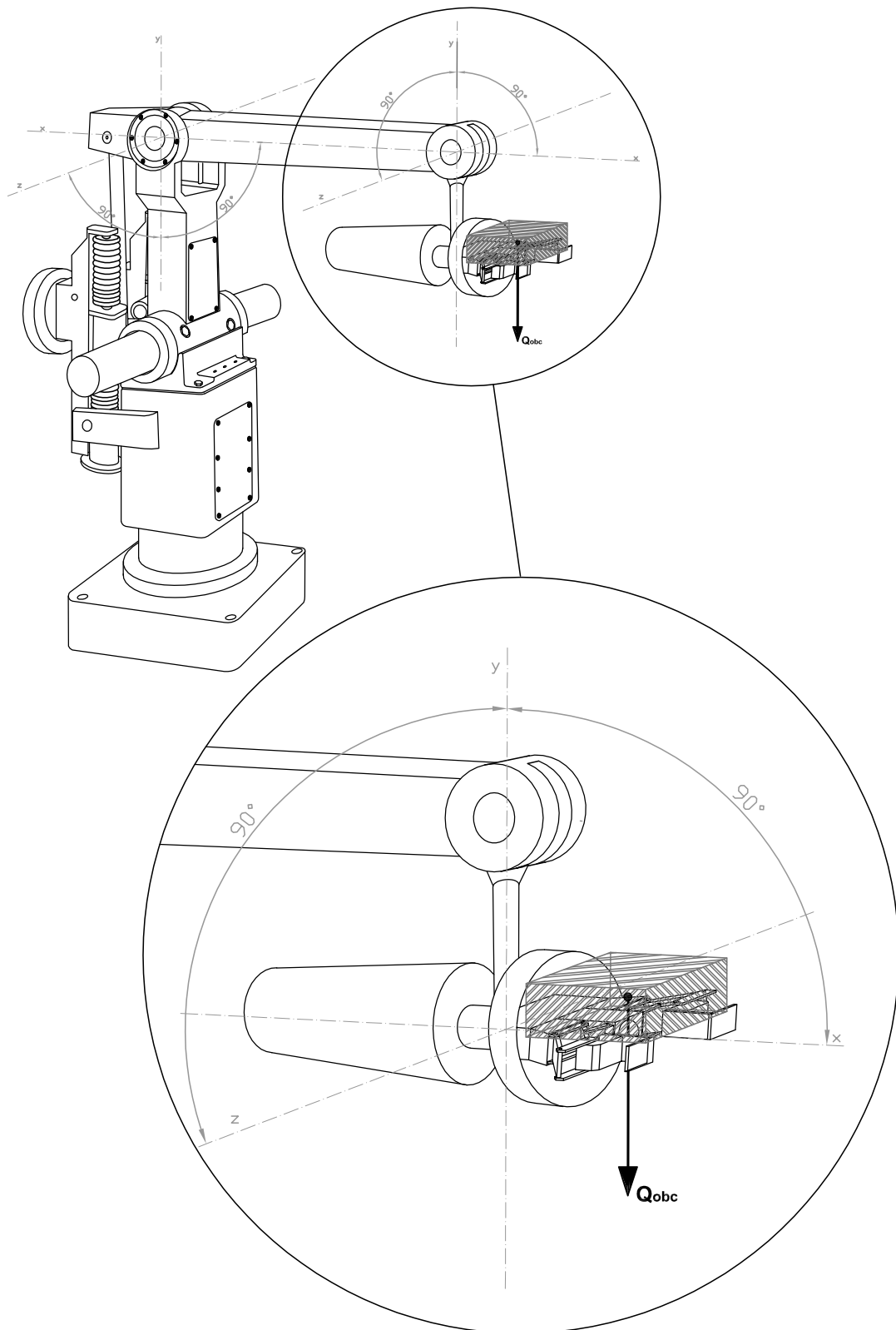
Budowanie urządzeń o strukturze modułowej znacznie ułatwia znajdowanie błędów oraz naprawę i rozbudowę. Patrząc z perspektywy czasu oraz zdobytych doświadczeń, korzystne byłoby wydzielenie części urządzenia odpowiedzialnej za dostarczanie odpowiednich poziomów napięć zasilania do oddzielnego modułu.



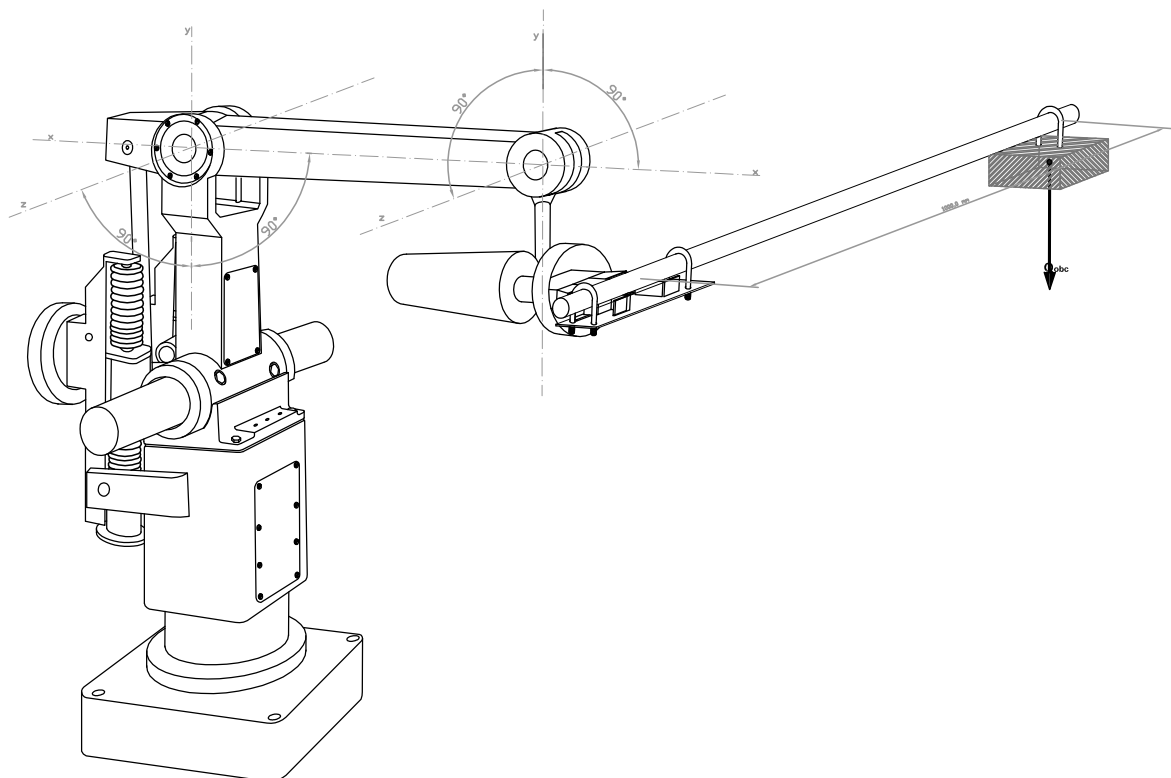
Rysunek 5.1: Ustawienie manipulatora podczas odczytu siły F_z .



Rysunek 5.2: Ustawienie manipulatora podczas odczytu siły F_x .



Rysunek 5.3: Ustawienie manipulatora podczas odczytu siły F_y .



Rysunek 5.4: Ustawienie manipulatora podczas odczytu momentu siły T_z .

Bibliografia

- [1] ATI Industrial Automation. *Installation and Operations Manual for Stand-alone F/T Sensor Systems*. <http://www.ati-ia.com>, 1993. [cytowanie na str. 6, 7, 8, 9]
- [2] ATI Industrial Automation. *Direct Interfacing to Transducer with Multiplexer Board*. F/T Transducer Technical Information. <http://www.ati-ia.com>, Listopad 2000. [cytowanie na str. 9, 11, 12, 25, 30]
- [3] Burr Brown. *INA103 Datasheet*. Marzec 1998. [cytowanie na str. 28]
- [4] Analog Devices. *AD574A Datasheet*. [cytowanie na str. 29]
- [5] Paul Horowitz and Winfield Hill. *Sztuka elektroniki*, volume 1. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 6 edition, 2001. [cytowanie na str. 27]
- [6] IAR Systems. *IAR Embedded Workbench Overview*. <http://www.iar.com/ew>. [cytowanie na str. 21]
- [7] Cezary Zieliński, Wojciech Szynekiewicz, Krzysztof Mianowski, Andrzej Rydzewski, and Tomasz Winiarski. *Efektory robota usługowego do dwuręcznej manipulacji z czuciem*. Politechnika Warszawska. [cytowanie na str. 6]

Dodatek A

Dane kalibracyjne czujnika ATI-IA Force/Torque 3084 Gamma

3beam 65N/5N-m European Sensor, Time:13:55, 4/15/1992, Serial #:FT3084.DAT
Counts per N = 20.0, Counts per N-m = 333.3, Software Ver.: NA
MaxForce = 65.0N, MaxTorque = 5.0N-m, Distance = 0.0000M

Tool # 5 : T-style, English 3-beam

	Length 1	Length 2	Length 3
Big Rod :	0.0330	0.0631	0.0737
Small Rod :	0.0134	0.0864	

BiasVectorString>

Calibration Matrix

```
\$
-0.000022  0.001325 -0.035134  0.640126  0.051951 -0.641909  0.000000  0.000000
 0.017570 -0.743414 -0.016234  0.372558 -0.032329  0.366082  0.000000  0.000000
-1.184654 -0.012028 -1.165485 -0.014266 -1.174821  0.002540  0.000000  0.000000
 0.007847 -0.144965  0.552931  0.079813 -0.571950  0.071877  0.000000  0.000000
-0.661215 -0.007048  0.337836 -0.125610  0.315335  0.132327  0.000000  0.000000
-0.010556  0.346443 -0.009666  0.344562 -0.031572  0.339944  0.000000  0.000000
```

