



Jan Czarnowski

Urodziłem się 26 grudnia 1990 roku w Norymberdze (Niemcy). Po ukończeniu szkoły podstawowej kontynuowałem naukę w Publicznym Gimnazjum nr 3 im. St. Staszica w Starogardzie Gdańskim, a następnie w I Liceum Ogólnokształcącym im. Marii Skłodowskiej-Curie w Starogardzie Gdańskim, w klasie o profilu matematyczno-fizycznym. W 2009 roku rozpocząłem studia inżynierskie na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, a w 2011 równoległe studia na wydziale Matematyki i Nauk Informatycznych. W roku 2012 uzyskałem tytuł inżyniera na Wydziale Mechatroniki po czym od razu rozpocząłem studia magisterskie na tym samym wydziale. Od 2012 roku pracuję w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów.

.....

Jan Fraś



Urodziłem się 21 września 1990 roku w Środzie Wielkopolskiej. Ukończyłem szkołę podstawową oraz gimnazjum w rodzinnej miejscowości, a następnie liceum Świętej Marii Magdaleny w Poznaniu. W 2009 roku rozpocząłem studia inżynierskie na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, a w 2011 równoległe studia na wydziale Matematyki i Nauk Informatycznych. W roku 2012 uzyskałem tytuł inżyniera robotyka na Wydziale Mechatroniki i rozpocząłem studia magisterskie na tej samej specjalności. Od 2012 roku pracuję w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów.

.....

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Mechatroniki

Praca dyplomowa magisterska

Jan Czarnowski, Jan Fraś

System fuzji danych dla projektu
STIFF-FLOP

Opiekun pracy:
dr hab. Barbara Siemiątkowska,
prof. Politechniki Warszawskiej

Instytut Automatyki i Robotyki

Warszawa, 2014

STRESZCZENIE

Miękka robotyka to stosunkowo młoda dziedzina robotyki zajmująca się wytwarzaniem, sterowaniem i modelowaniem manipulatorów wytworzonych przy użyciu miękkich materiałów. Tego typu urządzenia posiadają wiele zalet nad tradycyjnymi, sztywnymi rozwiązaniami. Niestandardowa i złożona konstrukcja miękkich robotów powoduje, że zagadnienia ich modelowania oraz kontroli są skomplikowane. Podstawową informacją o manipulatorze jest jego aktualna konfiguracja. Z uwagi na powyższe, wymagane było stworzenie odpowiedniego systemu fuzji danych. Niniejsza praca dyplomowa przedstawia szczegółowo opracowany system oraz inne, powiązane z nim rozwiązania.

ABSTRACT

Soft robotics is a relatively young branch of robotics, which deals with manufacturing, control and modeling of manipulators built with soft materials. This kind of solutions possess many advantages over the traditional, rigid ones. The nonstandard and complex design of soft robots causes the modeling and control tasks to be complicated. The basic information about a certain manipulator is its present configuration. Because of those facts, an adequate data fusion system had to be developed. This thesis presents the design and implementation of this system and other solutions, which are connected to it.

Spis treści

1	Wstęp	5
1.1	Wprowadzenie	5
1.2	Tradycyjne roboty chirurgiczne	7
1.2.1	Robot da Vinci	7
1.2.2	Robot RobInHeart	9
1.2.3	Robot Raven	10
1.3	Biorobotyka	11
1.3.1	Inspiracje zwierzętami	11
1.3.2	Biorobotyka w medycynie	12
1.4	Robotyka miękka	13
1.5	Projekt Stiff-Flop	14
1.6	Cel i zakres pracy	15
2	Manipulator Stiff-Flop	18
2.1	Budowa manipulatora	18
2.1.1	Budowa segmentu	19
2.1.2	Zasada działania	20
2.2	Źródła informacji	21
2.2.1	Sensory długości	21
2.2.2	Sensory ciśnienia	22
2.2.3	Powierzchniowe sensory taktylne	23
2.2.4	Sensory momentu i siły	23
2.2.5	Sensory sztywności	24
2.2.6	System wizyjny	24
3	Modelowanie	27
3.1	Model stałej krzywizny	27
3.1.1	Implementacja	28

3.2	Model fizyczny	30
3.2.1	Brak sił zewnętrznych	32
3.2.2	Działanie sił zewnętrznych	35
3.2.3	Implementacja modelu fizycznego	36
3.2.4	Czas wykonania i dokładność	38
3.2.5	Poprawność odwzorowania kształtu	39
4	Kinematyka odwrotna	42
4.1	Idea odwrotnej kinematyki	42
4.2	Implementacja	43
4.3	Optymalizacja wywieranej przez manipulator siły	44
4.4	Korekcja pomiaru siły zewnętrznej	45
5	Problemy z konstrukcją i propozycje zmian	46
5.1	Pole powierzchni przekroju komory i geometria przekroju manipulatora	46
5.1.1	Siła nieproporcjonalna do przyłożonego ciśnienia	47
5.1.2	Zależność kształtu manipulatora od kolejności aktywacji komór	47
5.1.3	Przesunięcie geometrycznego środka ciężkości przekroju komory	48
5.1.4	Proponowane zmiany	50
5.2	Sensor długości	50
5.3	Sensor siły i momentów	51
6	Nowa konstrukcja	52
6.1	Technologia wytwarzania	52
6.2	Testy	54
6.2.1	Charakterystyka ciśnieniowa	55
6.2.2	Charakterystyka objętościowa	55
6.2.3	Charakterystyka ciśnieniowo-objętościowa	57
6.2.4	Testy na rozciąganie i zgianie	57
6.2.5	Wyniki	58
7	System fuzji danych	60
7.1	Istota fuzji danych	60
7.2	Sposoby obliczania konfiguracji	60
7.3	Pierwsza koncepcja systemu	61
7.3.1	Implementacja	63
7.3.2	Weryfikacja	65

7.4	Druga koncepcja systemu	67
7.5	Aproksymacja siły	68
8	Oprogramowanie	72
8.1	System kontroli wersji	72
8.2	System ROS	73
8.3	Architektura systemu Stiff-Flop	76
8.3.1	Główna pętla programu	77
8.3.2	Akwizycja danych	79
8.3.3	Symulator	79
8.3.4	Wizualizacja stanu robota	80
8.4	Architektura systemu fuzji danych	81
8.5	Oprogramowanie sensora długości	83
8.6	Sterowanie bezpośrednio robotem	84
9	Testy	89
9.1	Metodyka badań	89
9.2	Stanowisko pomiarowe	89
9.3	Wyniki	90
10	Podsumowanie	95
	Bibliografia	96

Rozdział 1

Wstęp

1.1 Wprowadzenie

Laparoskopia (zwana także *chirurgią małoinwazyjną*) jest szeroko uznaną alternatywą dla tradycyjnej chirurgii otwartej. Jej zalety to, między innymi, zmniejszenie bólu pooperacyjnego, zmniejszenie utraty krwi, skrócenie czasu rekonwalescencji i pobytu w szpitalu. Z ich powodu laparoscopia szybko znalazła wiele zastosowań i została uznana za tzw. *złoty standard* przy operacji wycięcia pęcherzyka żółciowego (*cholecystektomia*) [1], guzów nadnerczy (*adrenalektomia*) [2] lub śledziony u dzieci (*splenektomia*) [3]. Oznacza to, że istnieją naukowe dowody potwierdzające że jest ona najlepszą dostępną w danym przypadku techniką. Ponadto prowadzonych jest wiele badań naukowych, które potwierdzają skuteczność laparoskopii w innych przypadkach, takich jak: operacja wycięcia guzów jelita [4–7] lub odbytu [8,9].



Rysunek 1.1: *Trokar* wykorzystywany do wytworzenia kanału przez powłoki ciała do okolicy operowanego narządu [10]

Istotą laparoskopii jest ograniczenie dostępu do organów wewnętrznych pacjenta do kilku (najczęściej trzech) portów trokarowych, w przeciwieństwie do dużych rozcięć w ciele stosowanych w chirurgii otwartej. Narzędzie wykorzystywane do wytwarzania tych portów zostało przedstawione na rys. 1.1. Podejście to, choć korzystne dla pacjenta, jest bardzo wymagające dla chirurga [11]. Brak bezpośredniego dostępu do pola operacyjnego wymusza zastosowanie dedykowanego systemu wizyjnego. Ustawianiem kamery laparoskopowej podczas operacji zajmuje się oddzielna osoba, która musi dobrze komunikować się z chirurgiem. Dodatkowo, standardowy dwuwymiarowy obraz stosowany w większości laparoskopów ogranicza zdolność postrzegania głębi chirurga. Długie i proste laparoskopy (rys. 1.2) mają ograniczoną ruchliwość z uwagi na wąski port wejściowy. Często wymusza to przyjmowanie przez chirurga nieergonomicznych pozycji. Pewne ustawienia narzędzi muszą być utrzymywane przez długi czas, co prowadzi do szybszego zmęczenia. Wszystkie te problemy powodują, że technika laparoskopowa jest trudną do nauczenia, dobrego opanowania i wykonywania.



Rysunek 1.2: Laparoskop [12]

Wykorzystanie robotów w chirurgii małoinwazyjnej pozwala na zmniejszenie lub rozwiązanie powyższych problemów [13]. Automatyczne sterowanie pozwala na zastosowanie większej liczby stopni swobody bez obciążania chirurga dodatkowymi obowiązkami, co z kolei znacznie ułatwia dostęp do organów zwiększając możliwości ruchowe narzędzia w polu operacyjnym. Robot jest w stanie utrzymywać zadaną pozycję przez dowolnie długi czas, przez co problem zmęczenia chirurga zostaje drastycznie zmniejszony. Istnieje również możliwość przeprowadzenia operacji zdalnie, przez chirurga znajdującego się wiele kilometrów od sali operacyjnej. Zastosowanie robotów w chirurgii małoinwazyjnej powoduje ułatwienie chirurgom nauki tej dyscypliny, co przyczynia się do jej popularyzacji.

W efekcie powstało wiele prototypowych robotów chirurgicznych. Wybrane projekty, będące w różnych stadiach wykonania, zostały przedstawione w rozdziale 1.2.

1.2 Tradycyjne roboty chirurgiczne

Popularyzacja zastosowania robotyki w chirurgii oraz rosnące możliwości technologiczne pozwoliły na powstanie i rozwój wielu robotów chirurgicznych. Niektóre z nich znalazły zastosowanie komercyjne i są z powodzeniem stosowane podczas operacji (np. system *da Vinci*). Podrozdziały 1.2.1 - 1.2.3 przedstawiają wybrane roboty o konstrukcji standardowej.

1.2.1 Robot da Vinci

System *da Vinci* stworzony przez firmę *Intuitive Surgical* jest obecnie najszerzej rozpowszechnionym robotycznym systemem chirurgicznym na świecie. Jest on stosowany w więcej niż 2500 szpitalach na całym świecie. Składa się z konsoli chirurga, robota chirurgicznego, narzędzi *EndoWrist* oraz systemu wizyjnego. Kompletny system przedstawia rys. 1.3.



Rysunek 1.3: Kompletny system *da Vinci Si* z dodatkową konsolą [14]

Konsola chirurga

Konsola jest przyrządem, za pomocą którego chirurg steruje robotem. Została ona zaprojektowana w celu zwiększenia ergonomii pracy operatora. Zabieg przeprowadzany jest w pozycji siedzącej, z rękoma ułożonymi w sposób ułatwiający koordynację ich ruchu z oczami. Widok pola operacyjnego z kamery endoskopowej przedstawiony jest za pomocą okularów. Konsola wyposażona jest również w mikrofon ułatwiający komunikację z resztą zespołu operacyjnego. Budowa systemu pozwala na umiejscowienie go w dowolnym miejscu na świecie i przeprowadzenie operacji zdalnie. Sterowanie robo-

tycznymi ramionami odbywa się przy pomocy specjalnych dżojstików, posiadających takie funkcje jak eliminacja drżenia rąk, lub zmiana stopnia przełożenia ruchu.

Robot chirurgiczny

Robot chirurgiczny *da Vinci* składa się z trzech lub czterech robotycznych ramion. Ramiona wyposażone są w narzędzia chirurgiczne *EndoWrist* dostarczane przez tę samą firmę. Pojedyncze ramię przedstawia rys. 1.4. Dwa z nich odpowiadają lewej i prawej ręce chirurga, trzecie zaś pełni funkcję pomocniczą i jest wykorzystywane w razie potrzeby. Czwarte z nich wyposażone jest w endoskopowy system wizyjny, sterowany przez operatora. Eliminuje to potrzebę obecności dodatkowej osoby dedykowanej wyłącznie temu zadaniu.

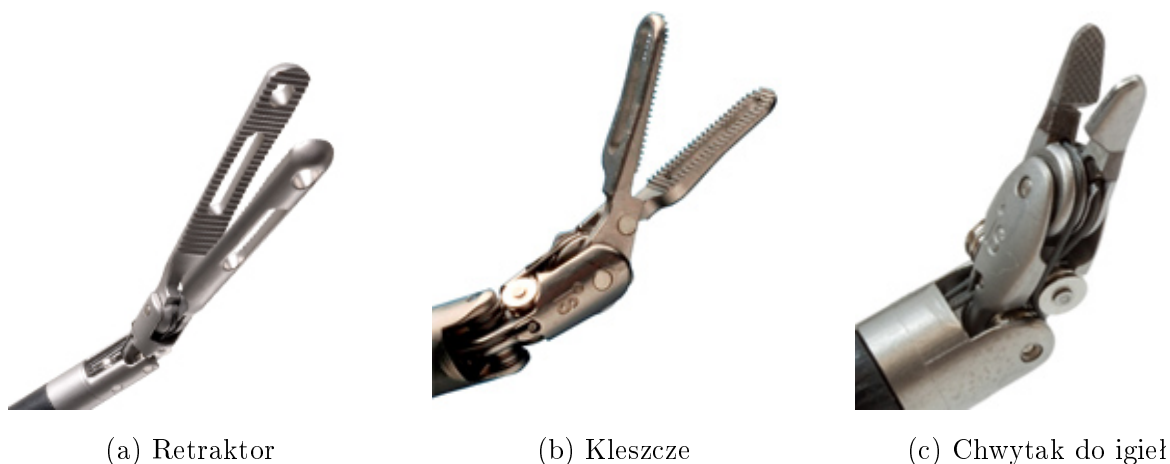


Rysunek 1.4: Jedno z ramion robota *da Vinci* [14]

Narzędzia *EndoWrist* posiadają siedem stopni swobody, dzięki czemu oferują chirurgowi dużo większą swobodę ruchu w stosunku do tradycyjnych endoskopów. Dostępnych jest wiele ich odmian przeznaczonych do różnych zadań - m. in. retraktory pozwalające na odsłonięcie operowanego organu (rys. 1.5a), kleszcze do chwytania (rys. 1.5b) lub chwytaki do igieł (rys. 1.5c).

System wizyjny

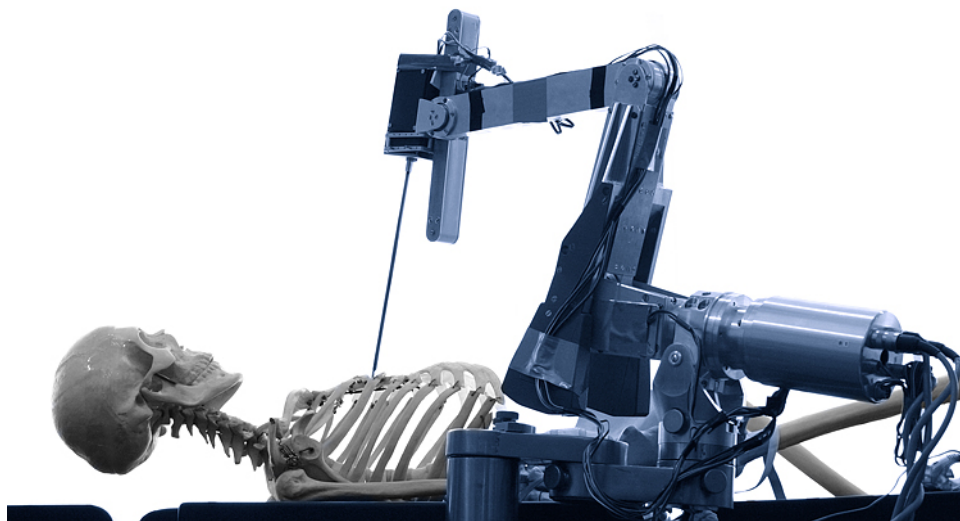
System *da Vinci* zawiera nowoczesny system wizyjny zapewniający trójwymiarowy obraz pola operacyjnego. Jest on zrealizowany poprzez zastosowanie oddzielnej kamery dla każdego oka. Pozwala to na naturalne postrzeganie głębi przez chirurga, co znacznie ułatwia wykonywanie operacji.



Rysunek 1.5: Zestaw narzędzi *EndoWrist* [15]

1.2.2 Robot RobInHeart

RobInHeart jest pierwszym polskim robotem chirurgicznym, którego głównym przeznaczeniem są małoinwazyjne operacje serca. Projekt rozpoczął się w roku 2000, kiedy Fundacji Rozwoju Kardiologii im. profesora Religi przyznany został grant na jego realizację. Opracowane zostały trzy wersje robota: *Robin Heart 0*, *Robin Heart 1* i *Robin Heart 2*, różniące się m.in. koncepcją sterowania czy mocowania. Stworzony został również projekt ergonomicznej konsoli sterowania. (*Robin Heart Shell*) – rys. 1.7a



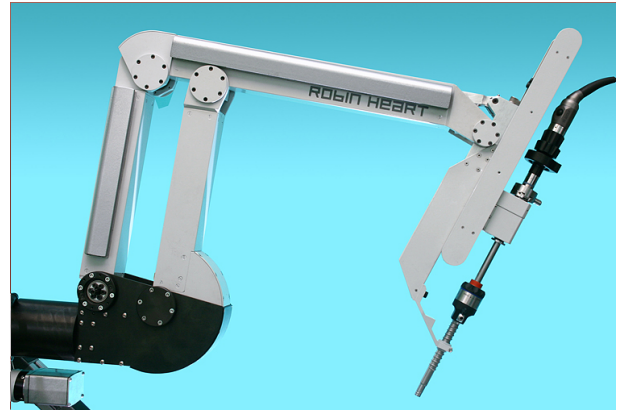
Rysunek 1.6: *RobInHeart 2* [16]

W roku 2007 do rodziny robotów *RobInHeart* dołączył *RobInHeart Vision* (rys. 1.7b), będący samodzielnym robotem sterującym położeniem toru endowizyjnego o sze-

rokiem polu aplikacji przy większości operacji małoinwazyjnych zastępując dzięki temu jednego z asystentów przy stole operacyjnym.



(a) *RobInHeart Shell*



(b) *RobInHeart Vision*

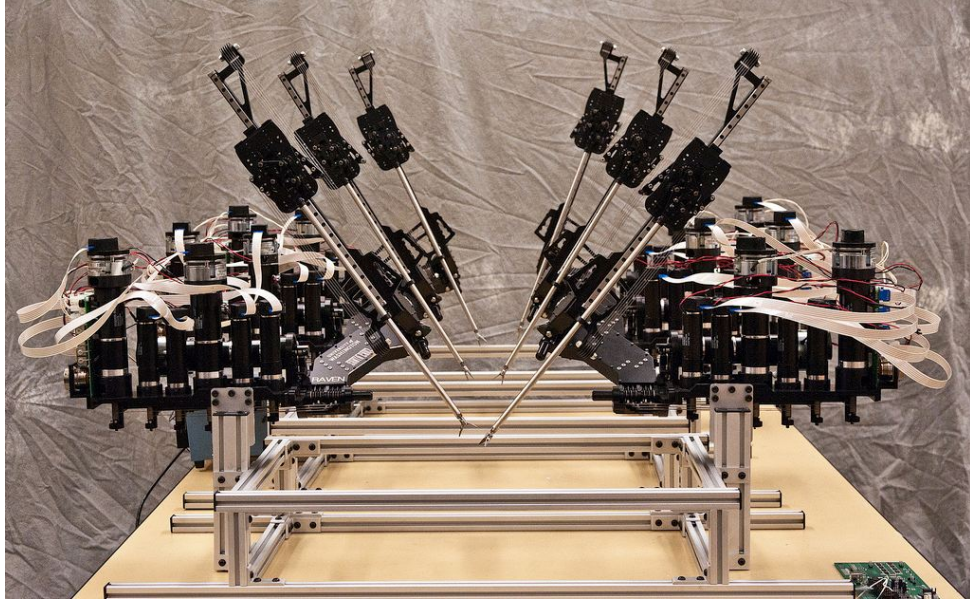
Rysunek 1.7: Rozwiązania z rodziny *RobInHeart* [16]

Kolejnym robotem jest *RobInHeart mc2* będący odpowiednikiem zagranicznego systemu *da Vinci*. Ma on być w założeniu pozbawiony ograniczeń robota *da Vinci*. Podobnie jak *da Vinci* posiada takie cechy jak generowanie obrazu 3D czy eliminację drżenia rąk chirurga. W jednym ramieniu *RobInHeart mc2* mogą być zamontowane dwa narzędzia z możliwością błyskawicznej ich zamiany w trakcie operacji. Likwiduje to potrzebę wyjmowania ramienia z pacjenta w przypadku potrzeby montażu innego narzędzia. Najważniejszą jednak przewagą polskiego rozwiązania ma być jego niski koszt. Obecnie, system *da Vinci* kosztuje około 9 milionów złotych – *RobInHeart* ma być o wiele tańszy. Nie powstała jeszcze jednak żadna jego komercyjna wersja.

1.2.3 Robot Raven

Raven to projekt robota chirurgicznego we wczesnym stadium rozwoju. Projekt ten, spośród innych prezentowanych rozwiązań wyróżnia całkowicie otwarta architektura systemu. W sieci udostępnione zostały schematy konstrukcji oraz elektroniki robota wraz z kodem źródłowym programów sterujących. Celem projektu jest weryfikacja koncepcji tzw. *asystowanej teleoperacji*. Według autorów, teleoperacja na duże dystanse nie jest jeszcze możliwa z uwagi na opóźnienia transmisji. Pomimo tego że nie są one znaczne, doprowadzić mogą do występowania niestabilności i niebezpiecznych sytuacji zagrażających pacjentowi. Rozwiązaniem tego problemu ma być *asystowana teleoperacja*, która polega na powierzeniu robotowi częściowej autonomii. Rolą chirurga miałyby być ograni-

czona do zlecenia robotowi wykonania mniejszych zadań i nadzoru. Rozwiązanie to łączy doświadczenie i intuicję chirurga z nadludzką precyzją, nieomylnością i szybkością robota [17]. System składający się z czterech ramion aktuowanych przy pomocy cięgien przedstawiony został na rys. 1.8.



Rysunek 1.8: Zestaw ramion *Raven* [18]

1.3 Biorobotyka

Termin *biorobotyka* łączy w jeden zbiór dziedziny *bioniki*, *cybernetyki* oraz *inżynierii genetycznej*. Jest on obecnie używany na dwa sposoby: po pierwsze, oznacza on naukę o modyfikowaniu organizmów biologicznych w taki sposób, aby były równie funkcjonalne i sprawne jak roboty. Przykładem prac z tej dziedziny są eksperymenty zdalnego sterowania zwierzętami, takimi jak myszy czy karaluchy. Z drugiej strony termin ten oznacza tworzenie konstrukcji robotycznych, które bezpośrednio inspirowane są mechanizmami znanymi z przyrody. W rozdziale tym przedstawione zostały informacje dotyczące drugiego znaczenia tego terminu i jego zastosowania w medycynie.

1.3.1 Inspiracje zwierzętami

Pomimo gwałtownego rozwoju technologii robotycznych, roboty wciąż ustępują ludziom i zwierzętom w wielu aspektach. Mechanizmy ich działania stały się wyrafinowane i efektywne po długim procesie usprawniania trwającym miliony lat ewolucji. Z tego po-

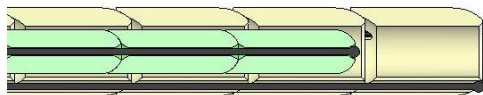
wodu, ważnym jest poznanie i zrozumienie zasad ich działania. Robotyka naśladowująca biologię jest jednym z obecnie najbardziej rozpowszechnionych trendów [19].

Jednym z aspektów, w których zwierzęta drastycznie przewyższają roboty jest lokomocja, będąca fundamentalnym problemem robotyki. Znanych jest wiele różnych sposobów przemieszczenia się zwierząt – latających (ptaki), pływających (ryby), chodzących (psy, małpy) oraz pełzających (węże). Każdy z tych sposobów lokomocji został już przetestowany pod kątem zastosowania w robotyce – powstały roboty kroczące sześcionożne, czworonożne, dwunożne (humanoidalne), roboty pełzające, pływające i latające.

1.3.2 Biorobotyka w medycynie

W zastosowaniu medycznym dużą popularność zyskały konstrukcje wzorowane na węzłach. Główną zaletą zachęcającą do rozwoju tego nurtu robotyki jest ich wrodzona umiejętność manewrowania w ciasnym i skomplikowanym środowisku. Obecne narzędzia stosowane w chirurgii małoinwazyjnej, pomimo posiadania sterowalnych końcówek, nie są w stanie efektywnie przemieszczać się w tego typu środowisku. W celu obejścia tego ograniczenia, powstały prototypy kateterów i próbników wieloprzegubowych imitujących sposób przemieszczania się i kształt ciała węży. *Laboratoire de Robotique de Paris* wykonało mechanizm o średnicy 8mm, który składał się z sekwencji segmentów połączonych złączami sterowanymi z wykorzystaniem materiałów SMA (stopów z pamięcią kształtu) [20]. Wadą mechanizmów opartych na SMA jest niska sztywność oraz wymagane wysokie napięcie aktywacji. Problematyczne jest również odprowadzanie ciepła spowodowanego przez energię elektryczną [21]. W [22] oraz [23] zastosowano *Nitinol* – specjalny stop metaliczny niklu z tytanem, który wykazuje się większą sztywnością. Istnieją również rozwiązania oparte o EPAM (electrostrictive polymer actuators - polimery elektrostrykcyjne) [24]. Ich zastosowanie pozwala na działanie manipulatora w trakcie rezonansu magnetycznego.

Przykładem innego rodzaju podejścia jest projekt HARP (wieloprzegubowy robotyczny próbnik). Jest to nowoczesny projekt robota kardiochirurgicznego przeprowadzającego operację przez jedno wejście w ciele pacjenta. Jego konstrukcja składa się z dwóch koncentrycznych rurek aktywowanych czterema cięgnami (rys. 1.9a). Poszczególne rurki mają zdolność do zmiany sztywności. Manipulator jest w stanie przyjąć kształt dowolnej krzywej w trzech wymiarach poprzez naprzemienne zmienianie sztywności zewnętrznej i wewnętrznej rurki. Sterowanie z wykorzystaniem cięgien oznacza brak energii elektrycznej wewnątrz próbniaka, co umożliwia jego zastosowanie podczas rezonansu magnetycznego. Całą konstrukcję przedstawia rys. 1.9b.



(a) Konstrukcja próbnika HARP



(b) Prototyp próbnika HARP

Rysunek 1.9: Próbnik HARP [21]

1.4 Robotyka miękka

Robotyka miękka to nowy dział robotyki zajmujący się robotami zbudowanymi z miękkich i deformowalnych materiałów takich jak silikon, plastik lub guma. Dzięki podatnej konstrukcji miękkie roboty są w stanie bezpiecznie wchodzić w interakcję z otoczeniem i ulegać znacznym deformacjom. Lepiej sprawdzają się w przypadku zadań takich jak chwytanie nieznanymi obiektów lub kontakt z żywymi tkankami. Dzięki swojej wrodzonej podatności są bezpieczne dla otoczenia, w którym operują. Istnieje również możliwość znacznego ograniczenia kosztu robota z powodu wykorzystania tańszych materiałów.

Rozwój robotyki miękkiej jest ograniczany przez kilka podstawowych problemów. Materiały wykorzystywane do budowy miękkich manipulatorów muszą posiadać odpowiedni zestaw cech. Obecnie, wciąż trwają prace nad ciągłym ulepszaniem istniejących materiałów lub tworzeniem nowych odmian, które mogą być z powodzeniem zastosowane w tej dziedzinie. Z powodu skomplikowanej konstrukcji manipulatorów miękkich, modelowanie oraz fuzja danych są bardzo wymagającym zagadnieniem i nie istnieją na chwilę obecną dostępne, gotowe ich rozwiązania. Również sensory i aktuatory muszą być wystarczająco elastyczne do zastosowania w tego typu konstrukcjach. Powyższe problemy są tematem badań wielu jednostek naukowych z całego świata, pracujących nad rozwojem dziedziny robotyki miękkiej.

1.5 Projekt Stiff-Flop

Projekt *Stiff-Flop* jest projektem finansowanym w ramach siódmego programu ramowego (7PR) Unii Europejskiej. Jego celem jest wytworzenie miękkiego manipulatora do zastosowań chirurgii małoinwazyjnej, a w szczególności chirurgii przez naturalne otwory ciała (ang. Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery, NOTES). Jest to eksperymentalna gałąź laparoskopii, polegająca na wykorzystaniu naturalnych otworów ciała: gardła, odbytu lub pochwy w celu uzyskania dostępu operacyjnego do narządów. Każde z tych naturalnych wejść stanowi wymagające środowisko pracy dla manipulatora, w którym tradycyjne narzędzia laparoskopowe nie mają zastosowania. W związku z tym, kwestię podstawową stanowi podatność i takie dostosowywanie kształtu manipulatora, aby uniknąć uszkodzeń tkanek. Projekt *Stiff-Flop* ma za zadanie wytworzenie manipulatora, który jest miękki kiedy wchodzi w interakcję z otoczeniem oraz sztywny w trakcie wykonywania czynności na operowanym organie. Dodatkowo, ma on rozwiązywać przedstawione w rozdziale 1.1 problemy laparoskopii.

Głównym źródłem inspiracji dla manipulatora *Stiff-Flop* jest biologia. Biologiczne "manipulatory" takie jak ramię ośmiornicy lub trąba słonia są w stanie manipulować obiektami jednocześnie kontrolując sztywność wybranych części i będąc podatnymi przy interakcji z innymi obiektami [25,26]. W ramach projektu przeprowadzono wiele badań ramienia ośmiornicy pod kątem jej zdolności do selektywnej kontroli sztywności oraz sposobów kontroli. Wykonane zostały również eksperymenty mające na celu ustalenie sposobu sterowania ramienia przez ośmiornicę. Wyniki badań zostały wykorzystane do zaprojektowania algorytmów kontroli oraz konstrukcji manipulatora.

Projekt obejmuje budowę całego systemu: zaprojektowanie i wytwarzanie manipulatora, dystrybuowaną i adekwatną sensorykę, zainspirowane biologicznie architektury kontroli i aktywacji, uczenie się oraz rozwój poznania przez interakcję z ludzkim nauczycielem i manipulację miękkich obiektów w skomplikowanych i dynamicznych środowiskach [27].

Jednym z założeń jest możliwość zastosowania manipulatora w trakcie badania z użyciem rezonansu magnetycznego. Istnieje również możliwość znacznego ograniczenia kosztów części wymiennych manipulatora aby ułatwić jego rozpowszechnienie i eksploatację. Nakłada to dodatkowe ograniczenia na zbiór możliwych do zastosowania rozwiązań. Z tego powodu wymagane jest opracowanie nowych rodzajów sensorów i materiałów do wykorzystania w projekcie. Robot ma mieć umiejętność automatycznego dostosowania swojego kształtu i sztywności w celu minimalizacji kontaktu z otoczeniem. Wymaga to odpowiedniej sensoryki oraz zaprojektowania i implementacji algorytmów automatycznej

kontroli. Dodatkowo, opracowywane są ergonomiczne metody sterowania manipulatorem przez chirurga.

1.6 Cel i zakres pracy

Znajomość aktualnej konfiguracji robota jest jednym z podstawowych informacji wymaganych przez większość jego podsystemów, takich jak: planowanie trajektorii ruchu lub kontrola pozycji końcówki. Obecnie dostępne czujniki położenia absolutnego bazują na bezpośrednim widoku swoich markerów lub modulacji generowanego pola magnetycznego. Generacja pola magnetycznego nie jest korzystna z uwagi na wymaganą kompatybilność z rezonansem magnetycznym. Z oczywistych względów nie jest również możliwe zastosowanie komercyjnych czujników wizyjnych. Konfiguracja manipulatora musi więc być estymowana na podstawie wartości pośrednich. Zagadnienie to nie jest trywialne z uwagi na skomplikowaną konstrukcję robota. Z uwagi na powyższe warunki, dodatkowe wyzwanie stanowi zastosowanie nowatorskich czujników, bazujących na technologii światłowodowej. Sensory te mają różne charakterystyki i żaden z nich nie jest doskonały. Innym utrudnieniem jest brak dostępności adekwatnych modeli analitycznych miękkich manipulatorów, które wykorzystywałyby dane z tych czujników.

Celem niniejszej pracy jest opracowanie skutecznego systemu fuzji danych dostarczającego informacji o aktualnej konfiguracji robota. W tym celu dokonano analizy dostępnych czujników, konstrukcji manipulatora (rozdział 2) oraz wymagań narzucanych przez specyfikę zadania (rozdział 1). Zagadnienie modelowania jest kluczowym elementem systemu. W związku z tym wykonany został przegląd istniejących rozwiązań, które są adekwatne do robota będącego przedmiotem badań. Z uwagi na ich ograniczenia, w ramach pracy opracowany został model fizyczny robota (rozdział 3). Poddany on został ilościowej oraz jakościowej weryfikacji w trakcie testów. Wyniki tych testów, wykonanych przez autorów pracy zaprezentowane zostały w rozdziale 9.

Opracowane zostały dwie wersje systemu fuzji danych. Każda z nich dostosowana była do ówczesnego stanu projektu. Pierwsza koncepcja wykorzystuje wyniki wszystkich dostępnych modeli manipulatora - modelu stałej krzywizny oraz modelu fizycznego. Koncepcja ta została zaimplementowana oraz przetestowana jakościowo. W uwagi na zmiany w projekcie oraz weryfikację modelu fizycznego powstała druga wersja systemu oparta w głównej mierze na nim.

Z uwagi na sukces odniesiony przez model manipulatora wytworzony w ramach pracy, jest on wprowadzany do innych elementów systemu Stiff-Flop. Pierwotnie, zagad-

nienie odwrotnej kinematyki bazowało na niedoskonałym modelu stałej krzywizny. W ramach pracy zaprojektowano również metodę wyznaczania kinematyki odwrotnej robota na podstawie modelu fizycznego (rozdział 4).

W trakcie pracy nad projektem wyzwaniem stanowił również proces tworzenia oprogramowania we współpracy z dużą grupą ludzi. Zagadnienie poddane zostało poddane analizie w rozdziale 8. Wykonanie zadań wymagało wytworzenia dużej ilości oprogramowania, którego efektywna współpraca musiała zostać zapewniona poprzez budowę odpowiedniej architektury systemu. Opracowana architektura, wybór języków programowania oraz zewnętrznego oprogramowania został również przedstawiony w tym rozdziale. Dodatkowo, opisuje on zaprogramowane przez autorów programy pomocnicze, które nie są związane bezpośrednio z żadnym podsystemem projektu.

Dodatkowo, podczas pracy w projekcie występowały różne niedogodności spowodowane jego badawczym charakterem. Niektóre z założeń ulegało zmianie w trakcie projektu, co często miało negatywny wpływ na system fuzji danych. W związku z tym, autorzy zaangażowali się w szereg zagadnień poza fuzją danych aby umożliwić jej efektywne wykonanie. Problemów dostarczała między innymi konstrukcja i sposób aktuacji manipulatora. Rozdział 5 przedstawia analizę zidentyfikowanych przez autorów pracy problemów. Na jej podstawie zaprojektowany, wytworzony i przetestowany został nowy projekt konstrukcji manipulatora (rozdział 6).

Niektóre z rozwiązań opracowane przez autorów opisane zostały w artykułach opublikowanych na różnych konferencjach oraz część z nich złożona została do urzędu patentowego. Na konferencji Automation 2014 przedstawiono wykonany w ramach pracy model fizyczny manipulatora. Pierwsza koncepcja systemu fuzji danych zaprezentowana została przez autorów na konferencji ICRA 2014. Na konferencję ICRA 2015 do recenzji złożony został artykuł opisujący nową konstrukcję manipulatora. Na jej podstawie złożono dwa wnioski do Urzędu Patentowego.

Część opisanej w tym dokumencie pracy, w tym część pomiarowa oraz prototypy manipulatorów, zostały wykonane w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP i sfinansowane ze środków projektu STIFF-FLOP (STIFFness controllable Flexible and Learn-able manipulator for surgical Operations) w obrębie 7. projektu ramowego Uni Europejskiej.

Podział pracy wygląda następująco:

Jan Czarnowski

zajmował się analizą wymagań i warunków narzucanych przez specyfikę zadania (rozdziały 1 oraz 2); opracowaniem koncepcji systemu fuzji danych oraz jej implementacją i testowaniem (rozdz. 7); oprogramowaniem, w tym jego tworzeniem oraz wykorzystywaniem gotowej infrastruktury projektu (rozdz. 8); weryfikacją jakościową i ilościową modelu fizycznego (rozdz. 9).

Jan Fraś

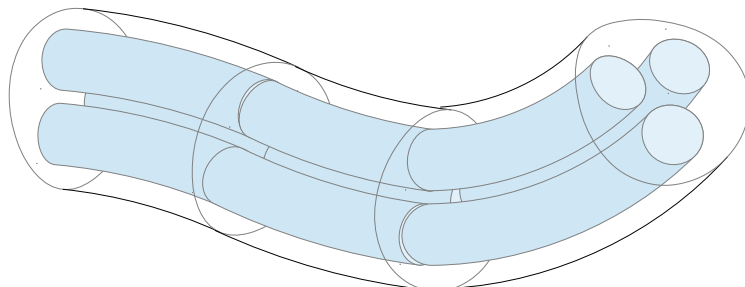
zajmował się analizą dostępnych modeli manipulatora i opracowaniem nowego modelu fizycznego robota (rozdz. 3); opracowaniem kinematyki odwrotnej manipulatora (rozdz. 4); identyfikacją problemów z ówczesną konstrukcją (rozdz. 5) i na tej podstawie zaprojektowaniem i wytwarzaniem nowej konstrukcji manipulatora (rozdz. 6).

Rozdział 2

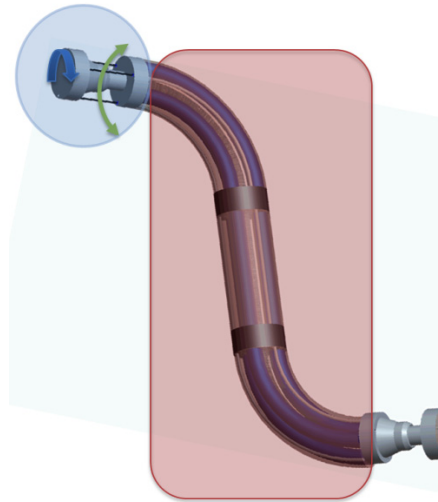
Manipulator Stiff-Flop

2.1 Budowa manipulatora

Zgodnie ze specyfikacją projektu Stiff-Flop, manipulator ma mieć długość 300mm. Musi też mieć możliwość zmiany swojej średnicy w zakresie od 30-12mm, wydłużania oraz kontrolowania sztywności i wytwarzania sił rzędu 10-20N w odpowiednich miejscach ramienia. W projekcie zdecydowano zastosować podejście modułarne. Schemat robota przedstawiony został na rysunku 2.1. Składa się on z trzech lub czterech identycznych miękkich części – tzw. segmentów. Każdy z segmentów ma możliwość kontrolowanego zginania w dowolnym kierunku, wydłużania oraz zmiany swojej sztywności. Dodatkowo, na końcu ramienia znajduje się specjalny moduł z zamocowanym narzędziem chirurgicznym, który umożliwi precyzyjną i swobodną jego orientację. Na rysunku 2.2 przedstawiony został rysunek CAD manipulatora z zamontowanym modulem końcowym. Purpurowy prostokąt obejmuje część miękką manipulatora, złożoną z segmentów (trzech). Niebieskim kołem objęto końcowy moduł z narzędziem chirurgicznym.



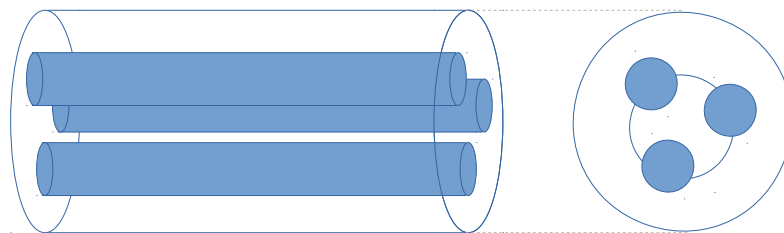
Rysunek 2.1: Schemat manipulatora Stiff-Flop złożonego z trzech segmentów [28]



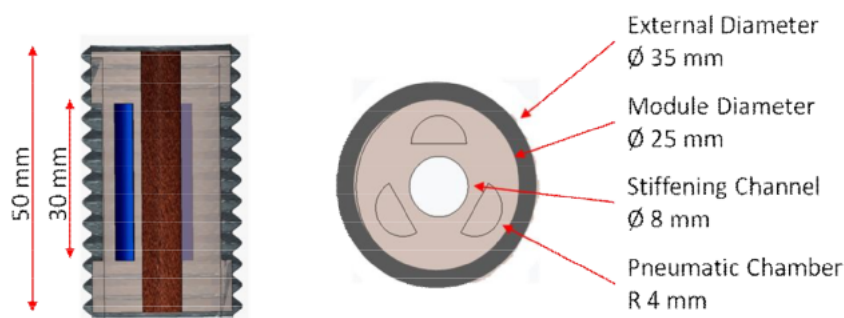
Rysunek 2.2: Rysunek CAD manipulatora Stiff-Flop

2.1.1 Budowa segmentu

Pojedynczy segment ma kształt cylindryczny i wytworzony jest z silikonu (obecnie jest to silikon Ecoflex 0030). Materiał ten jest odpowiednio miękki przy pasywnej deformacji i umożliwia wytworzenie wewnętrznych komór. Silikonowy cylinder zawiera trzy wydrążone komory, które są rozmieszczone równomiernie na okręgu (rys. 2.3), pozwalające na kontrolowaną zmianę jego właściwości. Dodatkowo, w centrum modułu znajduje się czwarta komora przeznaczona na mechanizm usztywniający. Wymiary segmentu przedstawia rysunek 2.4. W celu ograniczenia efektu ekspansji komory pod wpływem ciśnienia, segment z zewnątrz otacza owijka, która ma powstrzymać efekt tworzenia się pęcherza.



Rysunek 2.3: Układ komór wewnątrz segmentu Stiff-Flop



Rysunek 2.4: Wymiary pojedynczego modułu Stiff-Flop [26]

2.1.2 Zasada działania

Zginanie i wydłużanie

Celem projektu Stiff-Flop jest reprodukcja umiejętności i możliwości manipulacji ośmiornicy w wydajny i bezpieczny dla pacjenta sposób. Z tego powodu niektóre z rozwiązań biologicznych musiały zostać zaadaptowane lub zastąpione ekwiwalentem spełniającym wymogi operacji chirurgicznych. W szczególności znajduje to swoje odzwierciedlenie w sposobie aktywacji segmentu.

Zginanie w dowolnym kierunku zrealizowane jest za pomocą trzech komór ciśnieniowych. Pompowanie lub wypompowywanie cieczy roboczej powoduje wzrost panującego wewnątrz nich ciśnienia. Obecnie rolę cieczy roboczej spełnia powietrze. Różnice pomiędzy ciśnieniami panującymi w komorach powodują powstanie momentów zginających segment w określonym kierunku. Jak zostanie to udowodnione w rozdziale 3.1, pod wpływem zmiany ciśnień w komorach oraz przy braku zewnętrznych sił działających na układ i zakładając stałość przekroju poprzecznego poszczególnych komór, segment przyjmuje kształt wycinka koła.

Docelowo, segment ma mieć możliwość dwukrotnego wydłużenia. Realizowane jest to przez zwiększanie ciśnień we wszystkich trzech komorach jednocześnie. Jednakowy przyrost ciśnień powoduje powstanie naprężeń w komorach. Powstałe momenty gnące w tym przypadku równoważą się co powoduje, że niezerowy pozostaje jedynie komponent wzdłużny skutkujący wydłużeniem segmentu.

Usztywnianie

Zmiana sztywności segmentu uzyskiwana jest przy użyciu dodatkowej komory wydrążonej w silikonie. W efekcie badań nad efektywną metodą usztywniania wybrano metodę najbardziej odpowiadającą potrzebom projektu - *granular jamming*. Technika ta

przeprowadzana jest z wykorzystaniem granulatu oraz podciśnienia. Granulat (np. ziarna kawy lub grochu o różnych średnicach) umieszczony jest w elastycznym worku. Po wypompowaniu powietrza z worka cząstki ulegają zakleszczeniu co skutkuje usztywnieniem całej konstrukcji. Drobne ziarna dopasowują się do kształtu pojemnika, co umożliwia usztywnianie modułu w dowolnej pozycji. Technika ta została z powodzeniem wykorzystana m.in. do opracowania uniwersalnego chwytaka dla robotów [29].

W segmencie manipulatora Stiff-Flop, granulat wypełnia dodatkową komorę usztywniającą. Zmianę sztywności uzyskuje się bezpośrednio poprzez kontrolę ciśnienia panującego w tej komorze.

2.2 Źródła informacji

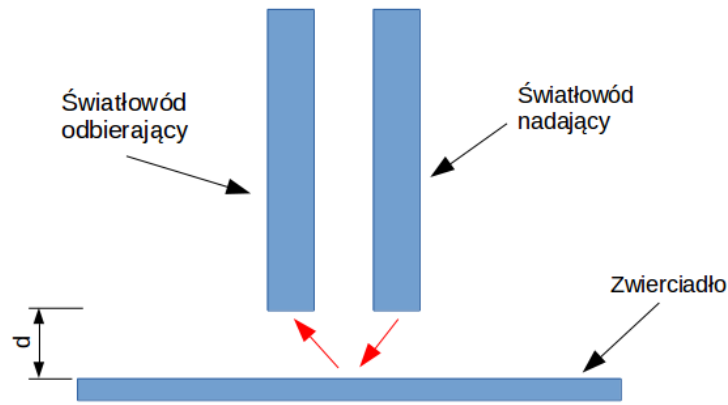
W celu umożliwienia obserwacji stanu manipulatora został on wyposażony w szereg sensorów dostarczających informację o różnych parametrach ramienia. Rodzaj i jakość informacji jest kluczowym zagadnieniem przy zadaniu estymacji jego aktualnej konfiguracji. Rozdziały 2.2.1 - 2.2.5 przedstawiają kolejno wszystkie sensory, które są dostępne dla procesu fuzji danych.

2.2.1 Sensory długości

Sensory długości mierzą długość poszczególnych komór ciśnieniowych. Ich zasada działania opiera się na technice światłowodowej. Wykorzystywany jest pomiar przemieszczenia przy pomocy modulacji intensywności światła. Koncepcję przedstawia rys. 2.5. W metodzie tej występuje para światłowodów poprowadzonych równolegle do siebie. Jeden z nich transmituje światło ze źródła do drugiego poprzez zwierciadło przesuwane w kierunku równoległym do światłowodów. Każda zmiana dystansu pomiędzy końcami światłowodów a zwierciadłem skutkuje zmianą intensywności światła docierającego do odbiorczego światłowodu. Ta zmiana intensywności pozwala na wyznaczenie odległości, o którą przemieściło się zwierciadło.

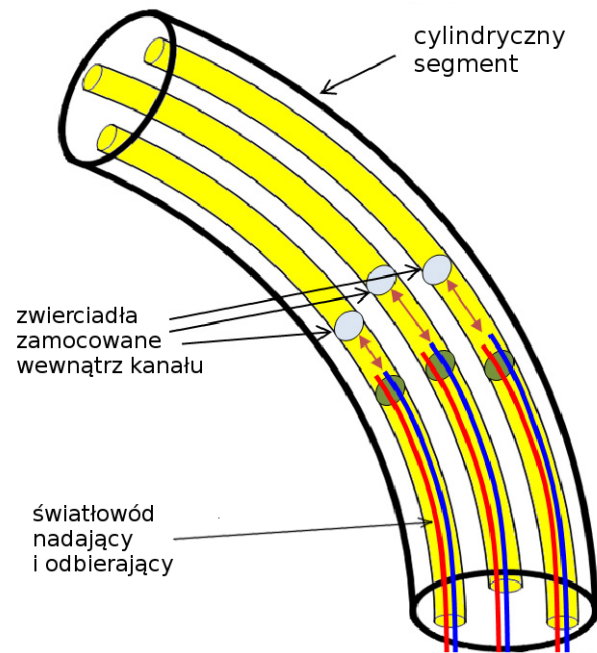
W celu określenia konfiguracji robota zastosowano podejście bazujące na pomiarze długości trzech kanałów. Rysunek 2.6 przedstawia metodę pomiaru. Kanały wydrążone są w segmencie i rozmieszczone są równomiernie na okręgu (rys. 2.7). Wewnątrz kanałów znajdują się przymocowane w pewnym miejscu zwierciadła. Podczas zginania segmentu, elementy przesuwają się względem siebie co umożliwia, po odpowiedniej kalibracji, pomiar długości całego kanału.

Podczas trwania projektu koncepcja pomiaru długości komór ciśnieniowych wie-



Rysunek 2.5: Pomiar przemieszczenia przy pomocy zmiany intensywności światła

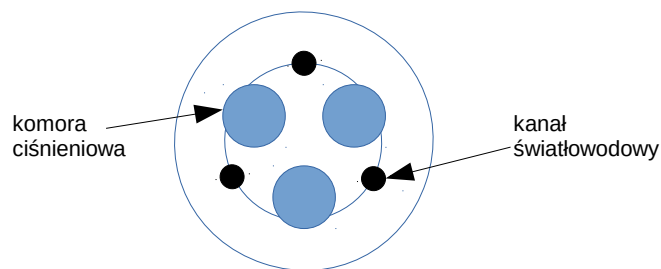
loktrotnie ulegała zmianie. Podstawowa zasada działania pomiaru przy użyciu zmiany intensywności światła pozostała jednak niezmienną.



Rysunek 2.6: Pomiar długości komór ciśnieniowych przy pomocy zmiany intensywności światła

2.2.2 Sensory ciśnienia

Aby umożliwić pomiar wartości ciśnienia w komorach, manipulator wyposażono w sensory ciśnienia. Informacja ta wykorzystywana jest w sprzężeniu zwrotnym pętli sterowania. Jest ona również przydatna w procesie określania konfiguracji manipulatora.



Rysunek 2.7: Rozmieszczenie kanałów światłowodowych w segmencie

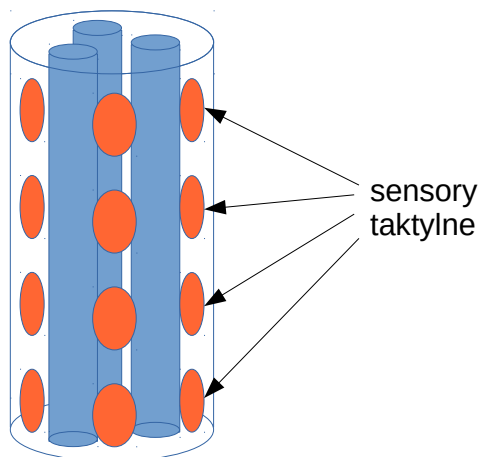
2.2.3 Powierzchniowe sensory taktylne

Każdy segment ma być wyposażony w macierz jednowymiarowych sensorów taktylnych rozmieszczonych na jego powierzchni. Mają one dostarczać istotną informację, jaką jest stopień interakcji ramienia z otoczeniem. Tego typu sensor wymagany jest do algorytmów kontroli ruchu manipulatora, które mają za zadanie minimalizować kolizje. Z punktu widzenia procesu fuzji danych, informacja pochodząca z powierzchniowych sensorów pozwala na uwzględnienie wpływu tych interakcji na kształt ramienia.

Działanie pojedynczego sensora taktylnego opiera się na podobnej zasadzie co w przypadku sensorów długości – mierzone jest przemieszczenie podatnego elementu przy pomocy pomiaru zmiany intensywności światła. Obecnie, pojedynczy sensor taktylny ma kształt pęcherza, który pod wpływem zewnętrznych sił ulega deformacji. Specjalny element podatny doznaje przemieszczenia w ich skutek. Przemieszczenie to mierzone jest przy pomocy metody światłowodowej. Odpowiednia kalibracja układu pozwala na wyznaczenie wartości siły działającej na pęcherz na podstawie zmierzonego przemieszczenia. Sensory taktylne rozmieszczone są równomiernie na powierzchni segmentu (rys. 2.8).

2.2.4 Sensory momentu i siły

Pomiędzy poszczególnymi segmentami ramienia oraz u podstawy znajdują się sensory momentu oraz siły. Stanowią one podstawowe źródło pomiaru sił i momentów zewnętrznych działających na manipulator. Ich rozmieszczenie przedstawione zostało na rys. 2.9. Sensory te mierzą momenty gnące w kierunkach poprzecznych segmentu i wzajemnie do siebie prostopadłych. Dodatkowo, dostarczają one informacji o wartości siły podłużnej, ściskającej lub rozciągającej, działającej na ramię. Zasada ich działania opiera się również na pomiarze przemieszczenia na podstawie mierzenia zmiany intensywności światła.



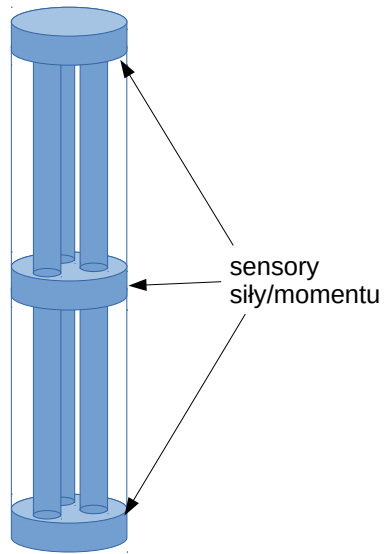
Rysunek 2.8: Rozmieszczenie sensorów taktylnych na powierzchni segmentu

2.2.5 Sensory sztywności

Sztywność segmentu zależy bezpośrednio od ciśnienia zadanego w komorze usztywniającej. Przy pomocy eksperymentów i kalibracji można otrzymać zależność sztywności manipulatora w zależności od zadanego ciśnienia. Precyzyjne sterowanie sztywnością segmentu wymaga jednak pomiaru jej aktualnej wartości. W obecnym stadium projektu, nie powstały jeszcze sensory sztywności możliwe do wykorzystania w systemie fuzji danych. Pomimo to, istotne jest, aby uwzględnić ich zastosowanie w procesie fuzji danych w przyszłości.

2.2.6 System wizyjny

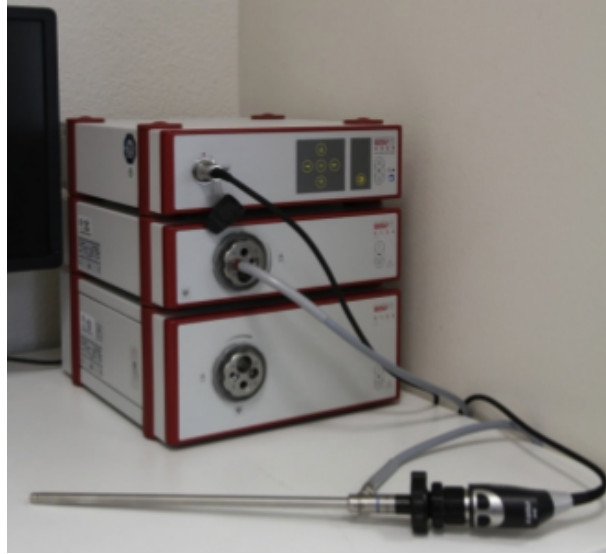
System wizyjny wykorzystywany jest z dwóch powodów. Po pierwsze, służy on za jedno z podstawowych źródeł informacji przedstawianych chirurgowi podczas operacji. Dzięki niemu, chirurg jest w stanie obserwować pole operacyjne i podejmować odpowiednie czynności. Drugim zastosowaniem systemu wizyjnego jest wykorzystanie obrazu w celu ekstrakcji informacji o pozycji manipulatora w przestrzeni. Wewnątrz ciała pacjenta, ramię obserwują dwie kamery endoskopowe (rys. 2.10). Znając pozycję kamery i stosując odpowiednie algorytmy przetwarzania obrazu możliwa jest estymacja pozycji widzianego fragmentu ramienia. Efektywne rozpoznawanie i lokalizację robota można osiągnąć poprzez pasywną obserwację lub zastosowanie aktywnych markerów. Drugie rozwiązanie jest częściowo ograniczone z powodu narzuconej przez założenia kompatybilności z rezonansem magnetycznym. Przy pasywnym rozpoznawaniu można użyć odpowiednich cech



Rysunek 2.9: Rozmieszczenie sensorów momentu

ramienia - zdefiniowane markery, kolor, itp.

Znając położenie ramienia względem jego zamocowania (manipulator *Schunk*), do wyznaczenia pozycji ramienia względem pacjenta lub stołu operacyjnego. potrzebne jest również śledzenie położenia zamocowania względem tych obiektów. Do tych celów wykorzystywany jest komercyjny system śledzenia *CamBar* firmy *Axios3D* (rys. 2.11a) oparty na rozpoznawaniu specjalnych markerów (rys. 2.11b).



Rysunek 2.10: Zastosowana w projekcie kamera *Endocam performance HD* firmy *Richard Wolf* [10]



(a) Głowica śledząca systemu *CamBar* firmy *Axios3D*



(b) Marker używany w systemie *CamBar*

Rysunek 2.11: System śledzący *CamBar* [30]

Rozdział 3

Modelowanie

Jedną z najbardziej podstawowych danych o manipulatorze jest jego konfiguracja w przestrzeni. Znajomość położenia poszczególnych elementów ramienia, a w szczególności efektora, jest kluczowa z punktu widzenia kontroli robota. Aby możliwe było określenie konfiguracji ramienia konieczna jest znajomość jego kinematyki. O ile nie jest to problemem w przypadku tradycyjnych manipulatorów o sztywnej konstrukcji, i dobrze określonej kinematyce, o tyle przestaje to być zagadnieniem trywialnym w przypadku manipulatorów ciągłych o nieograniczonej liczbie stopni swobody w których nie wyróżniamy dyskretnych węzłów kinematycznych. Ponadto zastosowanie manipulatora do celów medycznych pociąga za sobą konieczność jak najdokładniejszego wyznaczenia kształtu i położenia.

3.1 Model stałej krzywizny

Najpopularniejszym podejściem do rozwiązania kinematyki zarówno prostej jak i odwrotnej robotów ciągłych jest model manipulatora bazujący na założeniu stałej krzywizny [31]. W modelu tym, kształt robota opisany jest jako określona liczba łuków w przestrzeni, przy czym każdemu łukowi odpowiada jeden człon robota. W literaturze można spotkać się z kilkoma sposobami opisu matematycznego robotów ciągłych opisanym modelem stałej krzywizny [31]. Najbardziej standardowe podejścia to opis za pomocą krzywizny κ (wyrażonej za pomocą promienia łuku pisującego oś robota ρ poprzez: $\kappa = \frac{1}{\rho}$) , kierunku i długości łuku, lub za pomocą promienia, kąta środkowego łuku i kierunku. Założenie stałej krzywizny implikuje, że oś manipulatora leży na płaszczyźnie. Jeżeli założymy, że układ współrzędnych każdego członu manipulatora zaczepiony jest w jego początku, oraz że oś z jest w tym punkcie styczna do osi robota, przecięcie płaszczyzny członu z płaszczyzną xy definiuje kierunek łuku.

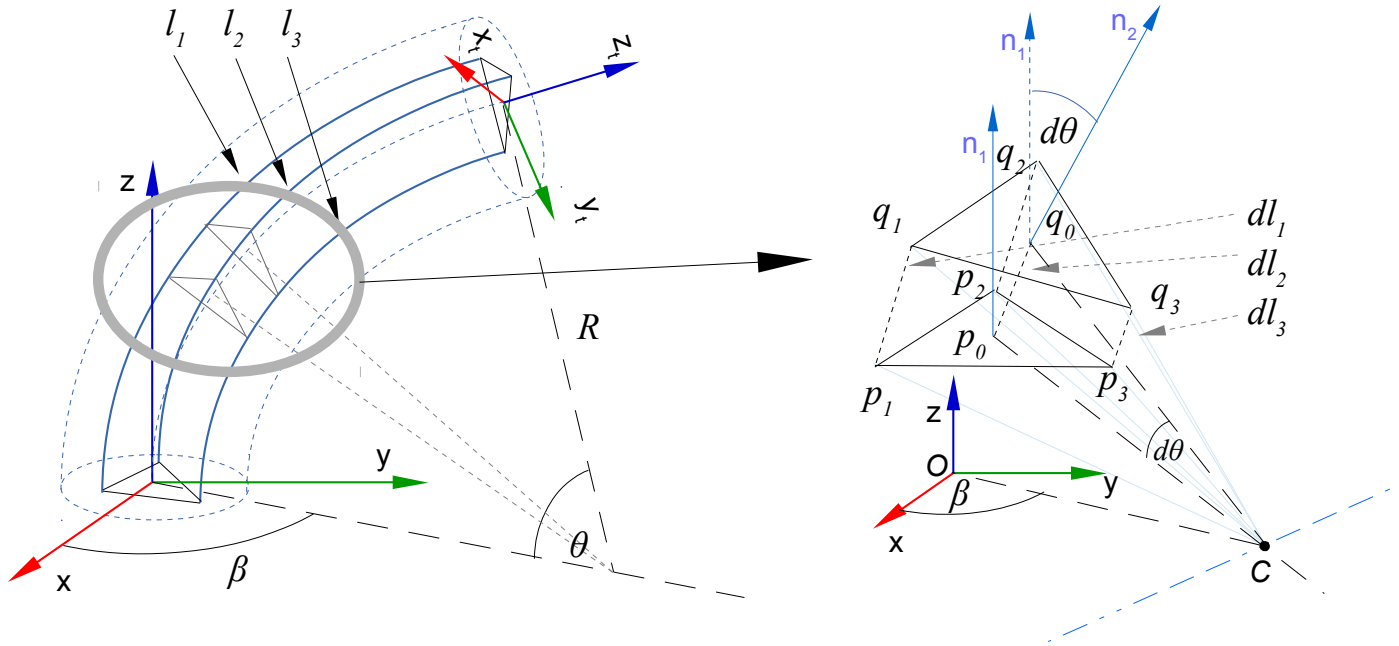
Przy najpopularniejszych konstrukcjach robotów ciągłych, założenie stałej krzywizny jest dość dobrym przybliżeniem. W większości przypadków symetria działania sygnału wejściowego powoduje, że krzywizna na całej długości jest taka sama (np ciśnienie - zgodnie z prawem Pascala ciśnienie panujące w zamkniętym naczyniu jest takie samo w całej objętości, zatem dwa dowolne przekroje manipulatora są takie same, zatem odkształcenia w tych przekrojach też powinny być takie same, co za tym idzie promień krzywizny także). Założenie to przestaje działać jeżeli na manipulator działają jakiegokolwiek siły zewnętrzne. Zostanie to uzasadnione w paragrafie 3.2.

W przypadku manipulatora będącego przedmiotem tej pracy, dla każdego członu dysponujemy informacją na temat trzech długości wyznaczanych przez sensory (Sensory długości, paragraf 2.2.1). Z perspektywy przekroju poprzecznego, sensory rozmieszczone są na wierzchołkach trójkąta, których współrzędne są znane. Przy założeniu, że na długości pojedynczego modułu, geometria trójkąta opisującego położenie sensorów jest stała, oraz osie poszczególnych sensorów są równoległe, można wyliczyć parametry łuku opisującego ten moduł za pomocą przekształceń geometrycznych [31].

3.1.1 Implementacja

Ze względu na budowę manipulatora i zastosowane czujniki, dane na temat geometrii jakimi dysponujemy to trzy, wyznaczane na podstawie intensywności światła, długości światłowodów poprowadzonych przez każdy z modułów manipulatora (paragraf 2.2.1). Aby możliwe było wyznaczenie kształtu robota, długości te muszą zostać przeliczone na współrzędne łuku w przestrzeni. Do tego celu zastosowany został algorytm zaproponowany w [31] oraz w [32]. Rysunek 3.1 przedstawia znane długości l_1, l_2 i l_3 zwracane przez sensory umieszczone we wierzchołkach trójkąta których współrzędne znamy, oraz szukane współrzędne β, θ, R (kąt ugięcia, kierunek ugięcia, promień krzywizny robota). Załóżmy dwie płaszczyzny prostopadłe do osi manipulatora w punktach p_0 i q_0 . Jeżeli kąt ugięcia θ jest niezerowy, to płaszczyzny te przecinają się pod pewnym kątem $d\theta$. Przyjmijmy punkt C będący rzutem punktu p_0 na przecięcie tych płaszczyzn. Oznaczmy poprzez dl_1, dl_2, dl_3 fragmenty łuków l_1, l_2, l_3 ograniczone przez te płaszczyzny. Wszystkie te łuki leżą na równoległych płaszczyznach i są ograniczone przez ten sam kąt, zatem ich długości są proporcjonalne do długości łuków l_1, l_2, l_3 (Rysunek 3.1).

$$\begin{aligned} dl_1 &= kl_1 \\ dl_2 &= kl_2 \\ dl_3 &= kl_3 \end{aligned} \tag{3.1}$$



Rysunek 3.1: Schemat rozmieszczenia czujników długości w pojedynczym module manipulatora.

Gdzie k jest czynnikiem skalującym.

Założmy, że kąt $d\theta$ jest mały, wtedy łuki p_1q_1 , p_2q_2 , p_3q_3 można przybliżyć odcinkami. Założmy, że znane są nam współrzędne punktów p_1 , q_1 , p_2 , q_2 , p_3 oraz q_3 , wtedy wektory \vec{n}_1 i \vec{n}_2 można wyznaczyć za pomocą 3.2.

$$\begin{aligned}\vec{n}_1 &= \frac{\overrightarrow{p_3p_1} \times \overrightarrow{p_2p_1}}{\|\overrightarrow{p_3p_1} \times \overrightarrow{p_2p_1}\|} \\ \vec{n}_2 &= \frac{\overrightarrow{q_3q_1} \times \overrightarrow{q_2q_1}}{\|\overrightarrow{q_3q_1} \times \overrightarrow{q_2q_1}\|}\end{aligned}\quad (3.2)$$

Następnie kąty $d\theta$ oraz β mogą zostać obliczone za pomocą równań 3.3

$$\begin{aligned}d\theta &= \arccos\left(\frac{\vec{n}_0 \cdot \vec{n}_1}{\|\vec{n}_0\| \|\vec{n}_1\|}\right) \\ \beta &= \operatorname{atan2}(n_{1y}, n_{1x})\end{aligned}\quad (3.3)$$

gdzie \vec{n}_0 i \vec{n}_1 są wektorami normalnymi do powierzchni przechodzących przez q_0 i q_1 n_{2x}, n_{2y} są współrzędnymi x i y wektora normalnego do powierzchni przechodzącej przez q_0 . Stosując twierdzenie cosinusów (równanie (3.4)) do trójkąta p_0, q_0, C (Rys.3.1) możemy obliczyć wartość promienia krzywizny R ((3.6))

$$a^2 + b^2 - 2ab \cos\gamma = c^2 \quad (3.4)$$

gdzie: a , b , c są długościami boków dowolnego trójkąta, γ - kąt pomiędzy a i b

$$R^2 + R^2 - 2RR\cos d\theta = |p_0q_0|^2 \quad (3.5)$$

$$R = \frac{|p_0q_0|}{\sqrt{2(1-\cos(d\theta))}} \quad (3.6)$$

zatem całkowity kąt ugięcia:

$$\theta = \frac{l}{R} \quad (3.7)$$

gdzie:

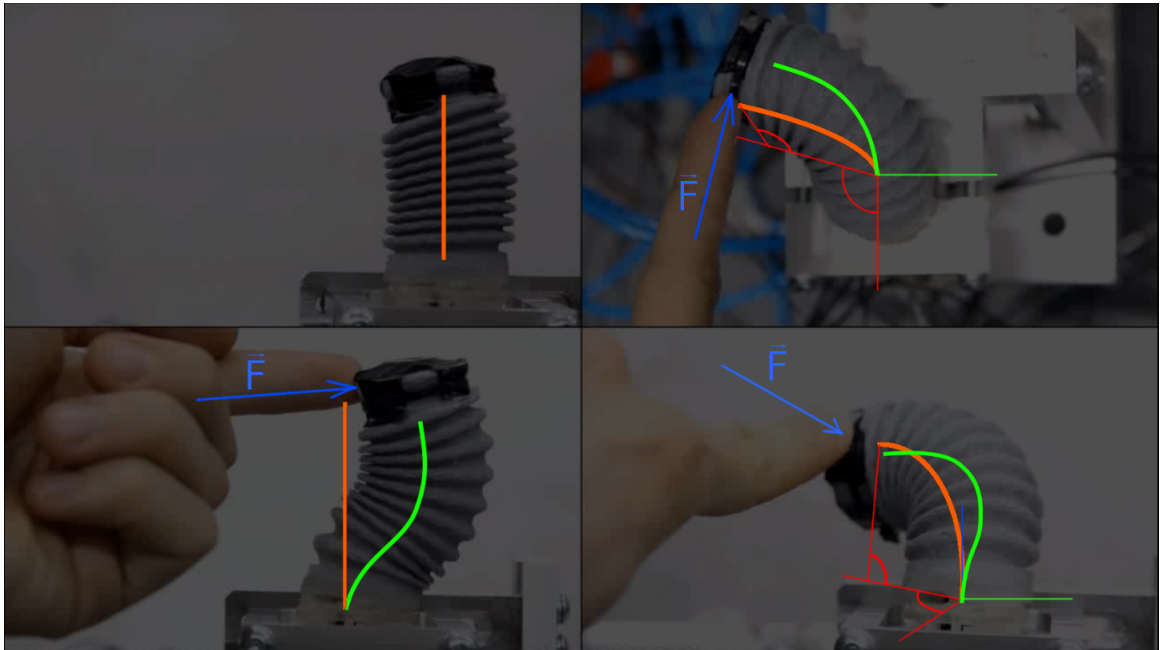
$$l = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{3} \quad (3.8)$$

Model stałej krzywizny jest łatwy do implementacji, i mało złożony obliczeniowo. Jego dokładność jest na wystarczającym poziomie aby wstępnie przybliżać kształt robota w sprzyjających warunkach. Jego ograniczenia nie są jednak możliwe do zaakceptowania w przypadku robota medycznego, dlatego opracowany został dokładniejszy model, opisany w kolejnym paragrafie.

3.2 Model fizyczny

W przypadku występowania sił zewnętrznych założenie modelu stałej krzywizny nie jest spełnione. Dowolna siła zewnętrzna powoduje, że moment gnący na długości modułu zmienia wartość, a co za tym idzie krzywizna nie może być stała (przy zastosowanej konstrukcji robota). Ponadto model stałej krzywizny nie uwzględnia odkształceń na skutek momentów skręcających. Na rysunku poglądowym 3.2 przedstawiono kilka sytuacji w których założenie stałej krzywizny nie jest spełnione. Na pomarańczowo oznaczono przebieg osi manipulatora zgodnego z tym założeniem, podczas gdy rzeczywisty przebieg oznaczono na zielono. Widać wpływ zmienności momentu gnącego oraz skręcającego na kształt ramienia. Szczególnym przypadkiem jest sytuacja w której ramię ma kształt przypominający literę S (Rys. 3.2, po lewej na dole). Dzieje się tak wtedy kiedy zewnętrzna siła prostuje zgięty ciśnieniem manipulator. Moment gnący pochodzący od siły ma małą wartość w pobliżu punktu przyłożenia siły, dlatego w tym obszarze dominuje moment pochodzący od ciśnień i manipulator zgina się zgodnie z kierunkiem aktywacji. W dalszych położonych punktach, ze względu na rosnące ramię działania siły, wartość momentu zewnętrznego zaczyna przewyższać wartość siły momentu wewnętrznego i krzywizna manipulatora zmienia się na przeciwną. W rezultacie długości zwracane przez sensor długości

są równe (co jest prawdą) i wynikiem modelu stałej krzywizny jest wyprostowany manipulator.



Rysunek 3.2: Charakterystyczne przypadki w których nie sprawdza się model stałej krzywizny. Na zielono oznaczono przebieg osi manipulatora, na pomarańczowo rezultat założenia stałej krzywizny. Na niebiesko symbolicznie przedstawiono działanie siły.

Istnieją gotowe rozwiązania uwzględniające powyższe efekty, takie jak symulatory implementujące metodę elementów skończonych, jednak ze względu na dużą złożoność obliczeniową nie nadają się do zastosowania w kontroli robota w czasie rzeczywistym. Istnieje konflikt pomiędzy dokładnością modelowania, uwzględnieniem wszystkich możliwych czynników, a czasem wykonania algorytmu. Dlatego konieczne okazało się opracowanie dedykowanego algorytmu, pozwalającego na względnie dokładne określenie kształtu modułu przy krótkim czasie wykonania.

Proponowane przez nas rozwiązanie bazuje na teorii Bernoulliego-Eulera i teorii sprężystości, oraz zakłada, że materiał manipulatora odkształca się w liniowym zakresie oraz że pole i geometria dowolnego przekroju są stałe, i nie zależą do ciśnienia panującego w komorach.

Algorytm bazuje na pomiarach ciśnień, oraz danych z czujników siły. Zakładamy że czujniki mierzą siłę w trzech osiach działającą na efektor, oraz siły zewnętrzne działające w miejscach łączenia modułów. Siły działające w innych będą w przyszłości mierzone za pomocą macierzy czujników rozmieszczonych na powierzchni modułu, jednak obecnie ze względu na brak możliwości weryfikacji zakładamy tylko siły działające w wymie-

nionych punktach. Model zakłada możliwość trzech rodzajów odkształcenia w każdym punkcie symulacji. Każdy moduł manipulatora symulowany jest oddzielnie, a oddziaływania pomiędzy modułami są traktowane jako zewnętrzne siły i momenty. Symulacja przeprowadzana jest iteracyjnie w kierunku od aktuatora do bazy.

3.2.1 Brak sił zewnętrznych

Kontrola manipulatora odbywa się poprzez wpompowywanie i wypompowywanie z komór cieczy roboczej. Efektem tego jest wzrost lub spadek ciśnienia w komorze, i zgodnie z prawem Pascala ciśnienie to jest w całej objętości komory takie samo. Ciśnienie w komorze może zostać potraktowane jako naprężenie wewnątrz modułu, i opisane wzorem (3.9)

$$p = \frac{F}{A} \quad (3.9)$$

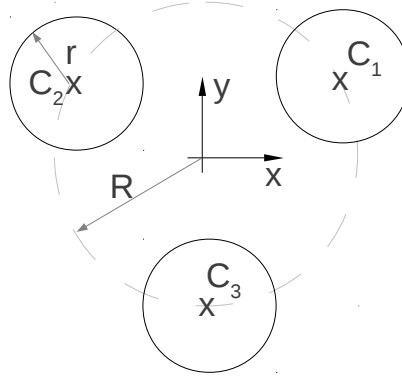
gdzie p - ciśnienie, F - siła działająca na powierzchnię o polu powierzchni A

Całkując naprężenia po powierzchni komory otrzymujemy wartość zastępczej siły która jest normalna do powierzchni przekroju, i przyłożona w środku ciężkości przekroju komory. Przeliczając w ten sposób ciśnienia z trzech komór uzyskujemy trzy siły działające na dany przekrój manipulatora. Ze względu na założenie stałości pola przekroju komory, oraz stałości ciśnienia w całej objętości komory, siły te są takie same w każdym badanym przekroju. Położenie komór w przekroju poprzecznym manipulatora przedstawiono na rysunku 3.3. Znając wartości, kierunki i punkty przyłożenia sił możemy wyznaczyć moment gnący względem momentu pierwszego rzędu, oraz siłę rozciągającą przekrój. Przy braku jakichkolwiek sił zewnętrznych, moment skręcający ma zerową wartość, ponieważ siły pochodzące od ciśnień są równoległe do osi całego manipulatora. Wzór wyrażający moment gnący względem środka ciężkości przekroju (3.10):

$$\vec{M}_{kp} = \vec{C}_{k1} \times \vec{F}_{k1} + \vec{C}_{k2} \times \vec{F}_{k2} + \vec{C}_{k3} \times \vec{F}_{k3} \quad (3.10)$$

gdzie: \vec{C}_{ki} oznacza wektor łączący środek ciężkości przekroju poprzecznego k manipulatora ze środkiem ciężkości przekroju poprzecznego komory i w tym samym przekroju k . F_{ki} oznacza siłę wynikającą z ciśnienia panującego wewnątrz komory i .

Odształcenia wynikające z momentu gnącego wyrażone są za pomocą wzoru Eulera-Bernoulliego (3.11):



Rysunek 3.3: Komory ciśnieniowe w przekroju poprzecznym manipulatora.

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{M_g}{EI} \quad (3.11)$$

Gdzie: κ oznacza krzywiznę, ρ wartość promienia krzywizny, M_g moment gnący, E moduł Younga silikonu, I moment bezwładności przekroju modułu.

Jeżeli na moduł nie działają siły zewnętrzne, to jedynym źródłem odkształcenia są ciśnienia, i wartość momentu gnącego jest stała na całej długości (ze względu na stałość przekroju i wartości ciśnienia). Z tego powodu krzywizna κ jest stała, (3.12).

$$\forall_k \kappa_k = \frac{M_g}{EI} \quad (3.12)$$

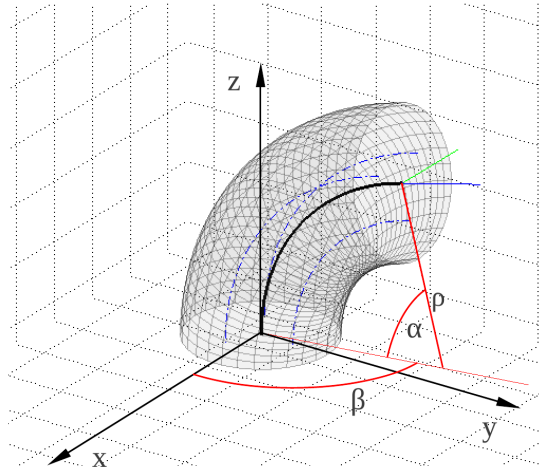
Gdzie: κ_k oznacza wartość krzywizny w przekroju k , M_g moment gnący, E moduł Younga, I moment bezwładności przekroju.

Przypadek taki pokrywa się z modelem stałej krzywizny, a kształt modułu opisany jest fragmentem okręgu, rysunek 3.4.

Kolejnym efektem działania ciśnienia jest wydłużenie modułu, które można opisać prawem Hoocke'a (3.13):

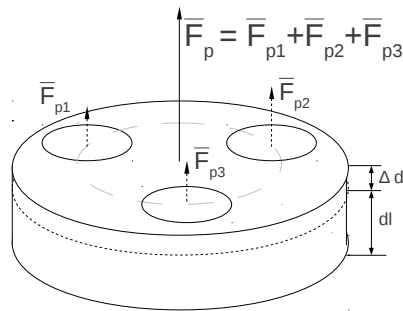
$$\Delta dl = \frac{F_p}{AE} dl \quad (3.13)$$

Gdzie F_p sumą sił pochodzących od ciśnień. Siły te mają tylko składową równoległą do osi modułu - efekty działania ciśnień w innych kierunkach są zniwelowane przez działania oplotu. Symbolem A oznaczone jest pole powierzchni badanego przekroju (bez pola powierzchni przekroju komór). Wydłużenie takie przedstawia rysunek 3.5:

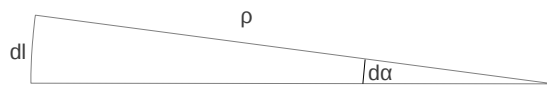


Rysunek 3.4: Kształt aktywowanego modułu przy braku sił zewnętrznych.

Ostatecznie całkowity kąt ugięcia można uzyskać całkując wyrażenie (3.14), rysunek 3.6, przy czym całkowite wydłużenie określa równanie (3.15) gdzie l_0 określa długość modułu w spoczynku.



Rysunek 3.5: Wydłużenie na skutek działania ciśnienia.



Rysunek 3.6: Elementarne ugięcie osi robota.

$$\alpha = \int_0^{l_0+\Delta l} d\alpha = \int_0^{l_0+\Delta l} \frac{1}{\rho} dl \quad (3.14)$$

$$\Delta l = \int_0^{l_0} \Delta dl = \int_0^{l_0} \frac{F_p}{AE} dl \quad (3.15)$$

3.2.2 Działanie sił zewnętrznych

W przypadku działania sił zewnętrznych na manipulator, równania (3.9) - (3.15) powinny zostać uzupełnione o czynniki wynikające z działania tych sił. Zwróćmy uwagę, że moment gnący nie pozostanie już stały na całej długości robota, ponieważ promień łączący punkt przyłożenia siły oraz poszczególnych punktów na osi ramienia zmienia się. Ponadto działanie zewnętrznej siły może spowodować powstanie momentu skręcającego. Moment gnący możemy przedstawić jako (3.16).

$$\vec{M}_k = \vec{M}_{kp} + \vec{M}_{k \text{ ext}} \quad (3.16)$$

przy czym $M_{k \text{ ext}}$ jest składową momentu w k -tym przekroju wynikającym z działania sił zewnętrznych (3.2.2)

$$\vec{M}_{ext} = \vec{F}_{ext} \times \vec{r}_k \quad (3.17)$$

gdzie \vec{r}_k jest wektorem łączącym punkt przyłożenia siły oraz oś manipulatora w punkcie przecięcia z k -tym przekrojem.

Biorąc pod uwagę efekt działania sił zewnętrznych i ciśnienia sumaryczne odkształcenia można przedstawić jako (3.18) oraz (3.19).

$$\vec{\kappa}_k = \frac{1}{\rho_k} = \frac{\vec{M}_k}{EI} \quad (3.18)$$

gdzie:

$$\vec{M}_k = \vec{M}_{kp} + \vec{F}_{ext} \times \vec{r}_k$$

oraz sumaryczne wydłużenie jako (3.19)

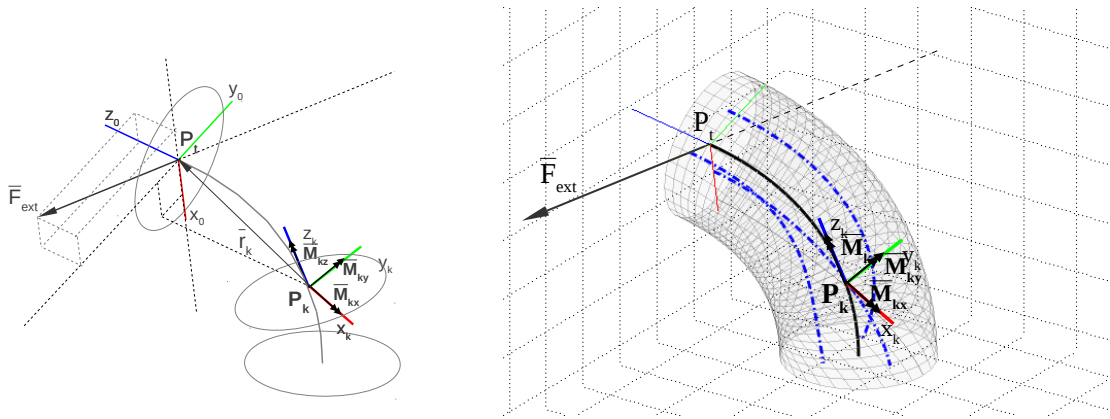
$$\Delta dl_k = \frac{F_k}{AE} dl \quad (3.19)$$

gdzie:

$$F_k = F_p + \vec{F}_{k \text{ ext},z}$$

przy czym $F_{k \text{ ext},z}$ jest składową z osi działającej na manipulator w układzie współrzędnych przekroju w którym przyłożona jest siła, rysunek 3.7.

Oprócz momentu gnącego i siły rozciągającej w ogólnym przypadku, na moduł działa też moment skręcający. Odkształcenia spowodowane momentem skręcającym można wyrazić równaniem (3.20).

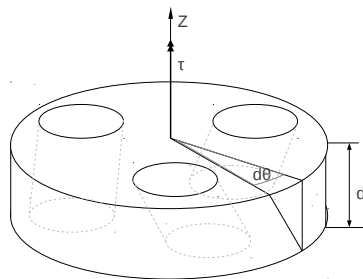


Rysunek 3.7: Momenty w k -tym przekroju.

$$d\frac{\theta}{dl} = \frac{T}{GI_0} \quad (3.20)$$

gdzie T jest wartością momentu skręcającego, G modułem Kirchhoffa oraz I_0 biegunowy moment bezwładności przekroju.

Elementarne skręcenie w k -tym przekroju przedstawione zostało na rysunku 3.8.



Rysunek 3.8: Elementarne skręcenie w k -tym przekroju.

Stosując powyższe wzory dla danego przekroju, istnieje możliwość wyznaczenia kształtu ramienia poprzez całkowanie przemieszczeń na długości manipulatora.

3.2.3 Implementacja modelu fizycznego

Analityczne wyznaczenie pozycji poszczególnych fragmentów robota nie jest łatwe, a wszystkie powszechnie znane z wytrzymałości materiałów metody wyznaczania przemieszczeń są w pewien sposób uproszczone, ponieważ zakładają małe przemieszczenia kątowe (Rys. 3.9). Upraszcza to bardzo obliczenia ponieważ pozwala całkować ugięcie

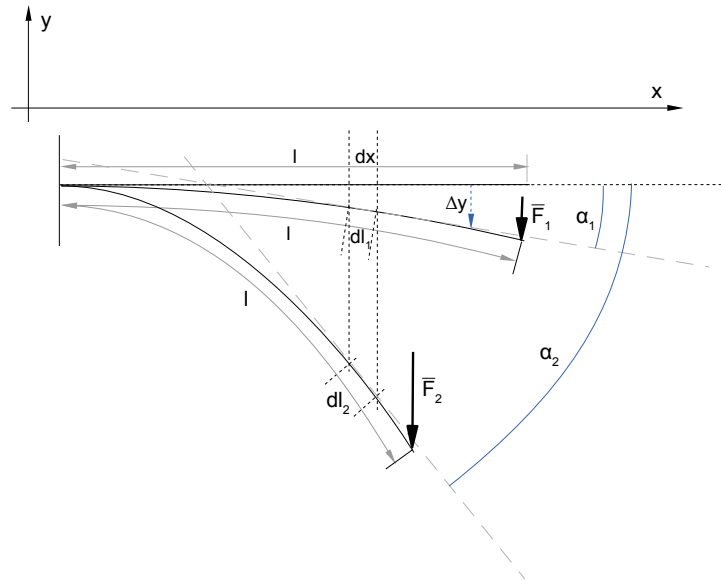
w zakresie od l do 0 po dx , etc. (równanie (3.21)). Dla małych kątów $\alpha = \alpha_1$ długości odcinków dx i dl_1 są w przybliżeniu takie same ((3.22)), jednak przy dużych ugięciach $\alpha = \alpha_2$ zależność ta przestaje działać((3.23)). Przemieszczenia, zarówno liniowe jak i kątowe, są w przypadku opisywanego robota duże, a co za tym idzie takie założenia dyskwalifikują powyższe metody.

$$y(x) = - \int \left[\int \frac{M_g(x)dx}{EI_z} \right] dx + Cx + D \quad (3.21)$$

C,D - stałe wynikające z warunków brzegowych

$$dl_1 = \frac{dx}{\cos(\alpha_1)} \approx \frac{dx}{1} = dx, \quad \alpha_1 \approx 0 \quad (3.22)$$

$$dl_2 = \frac{dx}{\cos(\alpha_2)} > \frac{dx}{1} = dx, \quad |\alpha_2| \gg 0 \quad (3.23)$$



Rysunek 3.9: Całkowanie przemieszczeń w klasycznych metodach wytrzymałości materiałów odbywa się przy założeniu, że przemieszczenia kątowe belki są na tyle małe, że całkowanie po dl równoważne jest całkowaniu po dx , oraz że $dl \parallel dx$.

Zaproponowana metoda została zaimplementowana w języku MATLAB oraz Python. Wyliczanie kształtu modułu odbywa się w kierunku od wierzchołka do bazy całego manipulatora. W n -tej iteracji wyznaczana są siły i momenty działające na dany przekrój segmentu w jego układzie współrzędnych. W zależności od wartości obliczane jest wydłużenie, a następnie ugięcie i skręcenie elementarnego odcinka modułu (3.24), (3.25) oraz (3.26).

$$\Delta l = \frac{L}{N} \left(1 + \frac{F_{nz}}{AE} \right) \quad (3.24)$$

$$\Delta \theta = \Delta l \frac{M_{nxy}}{EI_{xy}} \quad (3.25)$$

$$\Delta \beta = \Delta l \frac{M_{nz}}{GI_0} \quad (3.26)$$

gdzie: Δl - długość elementarnego odcinka manipulatora, $\Delta \beta$ - ugięcie na tym odcinku, $\Delta \theta$ - skręcenie na tym odcinku. N - to ustalona z góry liczba iteracji na moduł, od której zależy dokładność obliczeń, L - spoczynkowa długość pojedynczego modułu, F_{nz} - składowa z - siły działającej w n -tym przekroju, A - pole powierzchni przekroju, E - moduł Younga, M_{nxy} - długość wektora momentu gnącego rzutowanego na płaszczyznę XY w układzie współrzędnych przekroju, I_{xy} - geometryczny moment bezwładności przekroju względem osi przechodzącej przez jego geometryczny środek ciężkości i leżącej w płaszczyźnie przekroju, M_{nz} - składowa z momentu w układzie współrzędnych przekroju, G - moduł Kirchhoffa, I_0 - biegunowy moment bezwładności przekroju względem jego geometrycznego środka ciężkości.

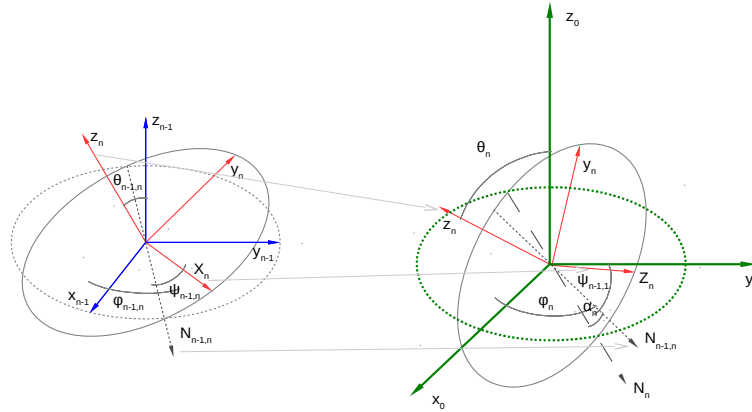
Kierunek ugięcia można wyznaczyć z (3.27).

$$\theta = \text{atan2}(M_y, M_z) \quad (3.27)$$

Na podstawie tych wartości wyznaczana jest transformacja (translacja + rotacja) do układu współrzędnych punktu $n + 1$, przy czym punkt o zerowym numerze znajduje się na punkcie końcowym manipulatora (Rys. 3.10).

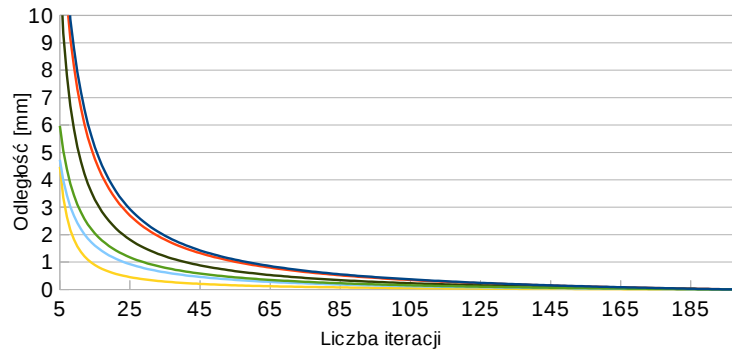
3.2.4 Czas wykonania i dokładność

Algorytm zaimplementowany w języku Python wykonuje się w pętli z częstotliwością 100Hz, przy symulacji dwusegmentowego modułu i przy całkowaniu w 30 krokach na moduł. Czas obliczeń jest proporcjonalny do liczby iteracji. Powyżej 50 kroków całkowania zmniejszenie kroku nie przynosi znacznej poprawy dokładności wyznaczania pozycji. Zmiana położenia punktu końcowego w konfiguracji dwumodułowej i przy długości spoczynkowej pojedynczego modułu wynoszącej 45mm przy zwiększeniu ilości iteracji z 50 do 200 wynosi średnio poniżej milimetra. Na rysunku 3.11 przedstawiono wykresy odległości



Rysunek 3.10: Rotacja z układu $n - 1$ do n , przez obrót wokół linii węzłów $N_{n-1,n}$.

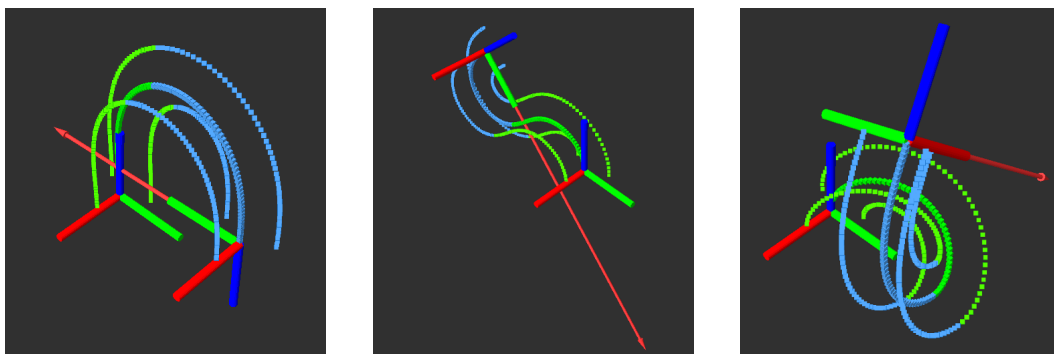
punktu na końcu manipulatora w opisanej powyżej konfiguracji od pozycji odpowiadającej dwustu iteracjom na moduł w funkcji liczby iteracji. Na rysunku 3.12 przedstawiono konfiguracje manipulatora odpowiadające tym przypadkom, wyliczone z precyzją 50 iteracji na moduł. Obrazy zostały wygenerowane w środowisku ROS za pomocą programu RViz.



Rysunek 3.11: Zależność odległości punktu końcowego od tejże wyliczonej z precyzją 200 iteracji na moduł w funkcji liczby iteracji.

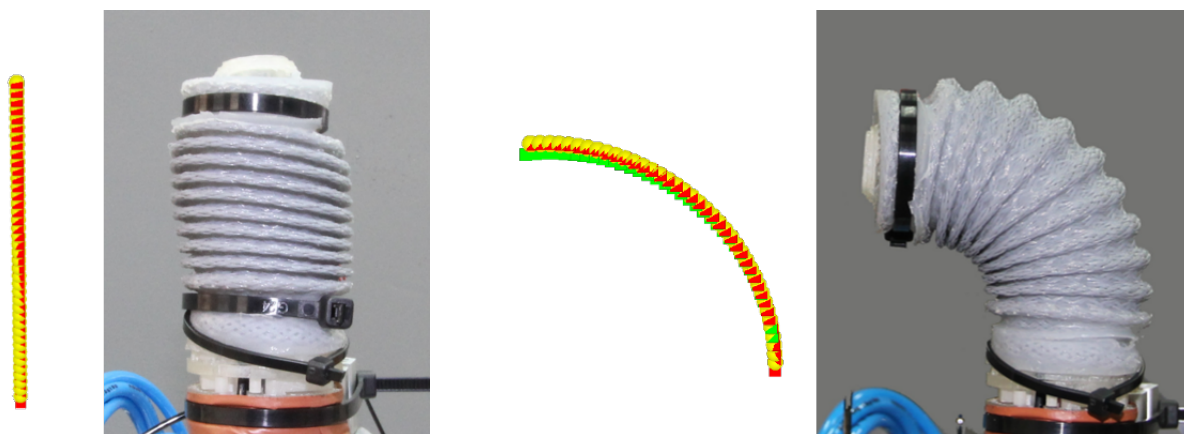
3.2.5 Poprawność odwzorowania kształtu

Działanie algorytmu jest jakościowo zgodne z zachowaniem rzeczywistego manipulatora. Rezultaty uzyskiwane w poszczególnych przypadkach są zgodne z założeniami. Na rysunku 3.13 oraz 3.14 przedstawiono porównanie kształtu symulowanego pojedynczego modułu z kształtem rzeczywistego ramienia Stiff-Flop w kilku charakterystycznych przypadkach. Widać, że w przypadku braku oddziaływań zewnętrznych kształt segmentu

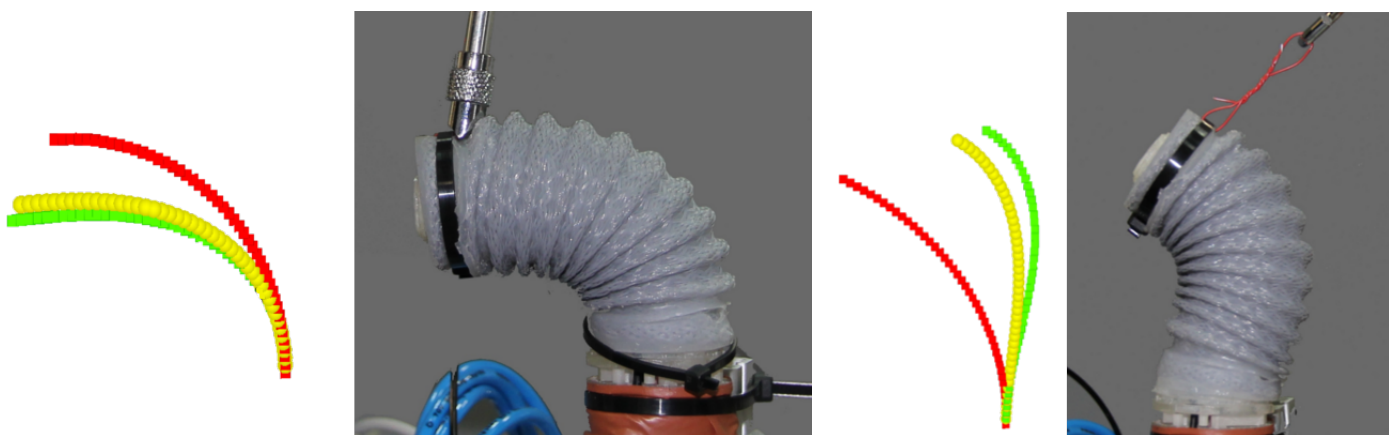


Rysunek 3.12: Wizualizacja konfiguracji testowanych pod kątem dokładności obliczeń w zależności od liczby iteracji.

z dobrym przybliżeniem odpowiada fragmentowi okręgu. Czerwonymi łukami oznaczono przebieg osi manipulatora bazujący na założeniu stałej krzywizny. Działanie sił zewnętrznych powoduje ugięcie manipulatora inne od fragmentu łuku, co jest poprawnie (przynajmniej jakościowo) odwzorowywane przez model fizyczny. Przy braku sił zewnętrznych odpowiedzi obu modeli pokrywają się.



Rysunek 3.13: Kształt manipulatora bez obecności sił zewnętrznych oraz odpowiedzi modeli.



Rysunek 3.14: Kształt manipulatora przy obecności sił zewnętrznych oraz odpowiedzi modeli. Czerwony -model stałej krzywizny, zielony -model fizyczny.

Rozdział 4

Kinematyka odwrotna

4.1 Idea odwrotnej kinematyki

Kontrola położenia narzędzia dowolnego manipulatora wymaga rozwiązania zagadnienia kinematyki odwrotnej. Kinematyka odwrotna robota o wyróżnionych węzłach kinematycznych, oraz sztywnej konstrukcji nie jest zagadnieniem trudnym do rozwiązania metodami geometrycznymi. Algorytmy wyznaczania równań prowadzących do rozwiązania zadania są znane, a same rozwiązania są łatwe do zaimplementowania w postaci cyfrowej. W przypadku manipulatora miękkiego zadanie nie jest trywialne, i nie powstał dotąd żaden analityczny algorytm pozwalający kontrolę położenie efektora robota ciągłego, za wyjątkiem algorytmów bazujących na uproszczonych analitycznych modelach takich jak model stałej krzywizny. Jak zostało uzasadnione w paragrafie 3.2, algorytmy takie nie nadają się do zastosowania w naszym przypadku. Ponadto, modele te są w stanie wyznaczać parametry łuków opisujących dane segmenty, a nie pożądane ciśnienia wejściowe, zatem w dalszym ciągu nie da się ich użyć wprost. Dotychczasowe rozwiązanie stosowane w konsorcjum polegało na rozwiązaniu odwrotnej kinematyki przy założeniu stałej krzywizny, następnie, na bazie współrzędnych stałokrzywiznowych (długość, kierunek i kąt ugięcia) wyznaczane było pożądane długości komór. Za pomocą zmiany ciśnień, komory fizycznego manipulatora zasilane były w taki sposób, aby osiągnąć żądane długości. Regulacja długości poszczególnych komór była realizowana za pomocą programowych regulatorów PID. Warto zwrócić uwagę, że algorytm ten wprowadza błąd już w założeniach (stała krzywizna) oraz że regulowanymi wartościami są długości komór, a nie położenie wierzchołka manipulatora.

Proponowany algorytm, bazuje na modelu opisanym w 3.2, i polega na iteracyjnym wyznaczaniu ciśnień wejściowych gwarantujących osiągnięcie zadanej pozycji. Anali-

tyczne rozwiązanie tego problemu jest zagadnieniem złożonym, i na chwilę obecną nie jest osiągalne przez autorów pracy. Istnieją rozwiązania oparte na metodach elementów skończonych, ale nie nadają się do zastosowania w projekcie przez wzgląd na wysoką złożoność obliczeniową.

4.2 Implementacja

Zaimplementowany algorytm jest algorytmem iteracyjnym i bazuje na modelu opisanym w paragrafie 3.2. Metoda polega na minimalizacji funkcji kosztu, którą jest odległość pomiędzy położeniem końcówki symulowanego manipulatora w danych warunkach a zadaniem położeniem (4.1). Minimalizacja odbywa się w kilku krokach, poprzez testowanie kolejnych zestawów ciśnień. Ciśnienia do następnej iteracji (4.2) wyznaczone są na podstawie wartości gradientu (4.3) w obecnym punkcie przestrzeni ciśnień. Gradient wyliczany jest poprzez testowanie zmian położenia końcówki symulowanego manipulatora w panujących warunkach przy niewielkich zmianach ciśnień wejściowych.

$$f(x) = \text{dist}(M(p_1, p_2 \dots p_n, f_1, f_2 \dots f_n), x_0, y_0, z_0), \quad (4.1)$$

gdzie $p_1 \dots p_n$ - ciśnienia wejściowe, $f_1 \dots f_n$ - siły działające na manipulator, x_0, y_0, z_0 - zadane położenie efektora.

$$p_{i+1} = p_i + \Delta p = p_i + [\Delta p_1 \Delta p_2 \dots \Delta p_n] = p_i + \frac{f(x)}{|\nabla(f(x))|} \cdot \nabla(f(x)) \quad (4.2)$$

gdzie p_i, p_{i+1} - ciśnienia w następnej i w obecnej iteracji, $\Delta p = [\Delta p_1 \dots \Delta p_n]$ - różnice ciśnień wyliczone na podstawie gradientu $\nabla(f(x))$ (4.3).

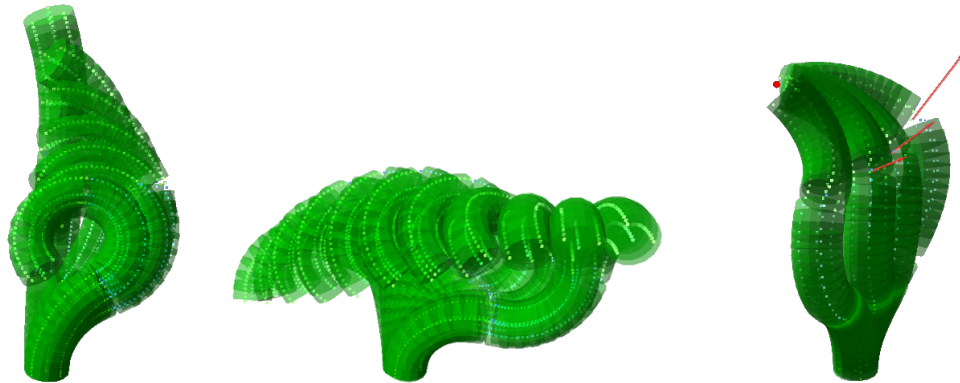
$$\nabla(f(x)) = \left[\frac{df(x)}{dx_1} \quad \frac{df(x)}{dx_2} \quad \dots \quad \frac{df(x)}{dx_n} \right]^T \quad (4.3)$$

Odległość położenia końcówki od zadanego punktu ciśnień nie jest liniową funkcją ciśnień wejściowych, dlatego w ogólnym przypadku, minimum nie jest osiągnięte w pierwszej iteracji, i operację trzeba wielokrotnie powtarzać. Oprócz tego istnieją obszary w których skoki o wartości wyrażonej przez (4.2) powodują że minimum jest znacznie "przeskakiwane", czego konsekwencją jest wzbudzenie się algorytmu lub bardzo wolna zbieżność. Eksperyment pokazuje, że dobre efekty przynosi wprowadzenie dodatkowego czynnika a do równania (4.2) o wartości mniejszej niż 1, przez co zbieżność jest wolniejsza, ale bardziej stabilna (4.4).

$$p_{i+1} = p_i + \Delta p \cdot a, \quad (4.4)$$

gdzie : $a < 1$

Rysunki 4.1a oraz 4.1b przedstawiają kolejne położenia manipulatora w przypadku realizacji przemieszczenia liniowego oraz utrzymywania pozycji przy działaniu zmiennej siły zewnętrznej.



(a) Ruch liniowy.

(b) Utrzymywanie zadanej pozycji, zmienna siła.

Rysunek 4.1: Wizualizacja algorytmu odwrotnej kinematyki dla trójsegmentowego manipulatora.

Algorytm przerywany jest w momencie w którym wartość błędu spadnie poniżej pewnej ustalonej wartości, lub zmiany tej wartości pomiędzy kolejnymi iteracjami staną się odpowiednio małe. W zależności od działających na moduł sił, oraz ilości modułów minimalizowana funkcja może posiadać wiele minimów, więc zbieżność nie jest gwarantowana. Ponadto, dla dwóch i więcej modułów, nie istnieje jednoznaczne rozwiązanie (6 i więcej stopni swobody), i zależnie od punktu startowego, algorytm wygeneruje inne rozwiązanie.

4.3 Optymalizacja wywieranej przez manipulator siły

Równie istotnym jak kontrola pozycji manipulatora jest zagadnienie kontroli siły wywieranej przez manipulator na ciało pacjenta. W szczególności, w konkretnych sytuacjach konieczne jest znalezienie takiego ułożenia manipulatora które zapewni możliwość maksymalizacji siły wywieranej przez robota w konkretnym miejscu przestrzeni. Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki Newtona, siła działająca na manipulator w miejscu kontaktu

z obiektem zewnętrznym jest równa co do wartości sile wywieranej przez manipulator na ten obiekt. Ma ona ten sam kierunek i przeciwny zwrot co siła działająca na manipulator. W związku z tym, że proponowany algorytm uwzględnia siły działające na robota, istnieje możliwość przeprowadzenia symulacji pod kątem możliwości wygenerowania pewnej konkretnej siły w pewnym konkretnym punkcie.

4.4 Korekcja pomiaru siły zewnętrznej

W pewnych sytuacjach konieczne jest ustalenie sił (wartości i kierunków) które skutkują jakimś konkretnym ułożeniem robota. Zadanie takie może zostać zrealizowane przez dokładnie taki sam algorytm, jednak ze zmienionymi parametrami wejściowymi, z ciśnień na siły. Korzystając z tego samego algorytmu wyznaczania kształtu, oraz z tej samej metody określania wartości sił dla następnej iteracji, możliwe jest iteracyjne określenie wartości i kierunków sił, które gwarantują osiągnięcie odpowiednich pozycji. Działanie takie znajduje zastosowanie w opisanym w 7.4 algorytmie fuzji danych na potrzeby poprawy jakości wyznaczania ułożenia manipulatora, podczas gdy dysponujemy dokładnym pomiarem ciśnienia, absolutną pozycją kilku dyskretnych punktów manipulatora, oraz tylko przybliżonymi wartościami sił działających na manipulator.

Rozdział 5

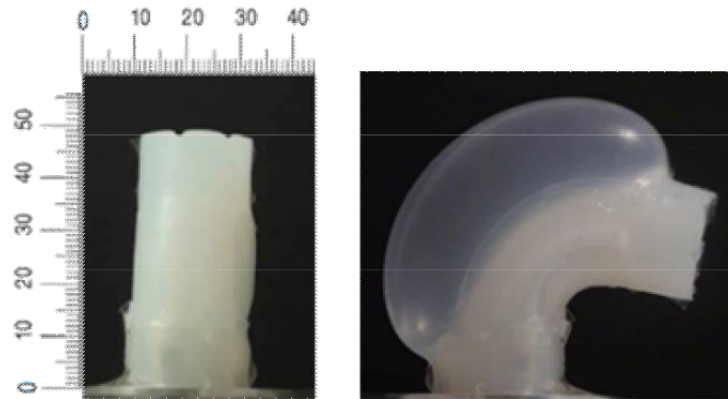
Problemy z konstrukcją i propozycje zmian

Podczas prac nad manipulatorem napotkaliśmy na serię problemów i ograniczeń wynikających z zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych. Problemy te wynikają zarówno z niedoskonałości zastosowanych materiałów, jak i nie do końca przetestowanych rozwiązań konstrukcyjnych zastosowanych przez konsorcjantów. W konsekwencji przeprowadzonych prac zaproponowano metody i podjęto próby rozwiązania kilku z wymienionych poniżej problemów.

5.1 Pole powierzchni przekroju komory i geometria przekroju manipulatora

Zwiększenie ciśnienia w komorze, oprócz jej wydłużenie powoduje także zwiększenie się pola powierzchni jej przekroju. Fakt ten zauważono wcześniej w projekcie, ale nie został on do końca poprawnie zinterpretowany. Efektem zewnętrznym działania ciśnienia jest powstanie pęcherza (Rys. 5.1) co z kolei powoduje mocniejsze ugięcie (niestała krzywizna) oraz zmianę geometrii przekroju manipulatora. Powstawanie pęcherza zostało zlikwidowane poprzez nałożenie opłotu po zewnątrz części manipulatora. Dzięki temu kształt ramienia uzyskiwany przy napompowaniu komory jest zbliżony do łuku, a obrys przekroju na długości manipulatora pozostaje stały. Pomimo ograniczenia zewnętrznych objawów rozszerzania komór, rozszerzają się one nadal, jednak dzieje się to wewnątrz manipulatora. Wzrost ciśnienie w jednej z komór powoduje powiększenie jej średnicy, i w konsekwencji, zmniejszenie średnicy pozostałych komór. Ponadto, rozrost komory jest od zewnątrz zatrzymywany przez opłot. Oznacza to że w obszarze redukcji pęcherza sylikon

jest dociskany do materiału oplotu. W stanie spoczynku pomiędzy oplotem a silikonem istnieje pewien luz.



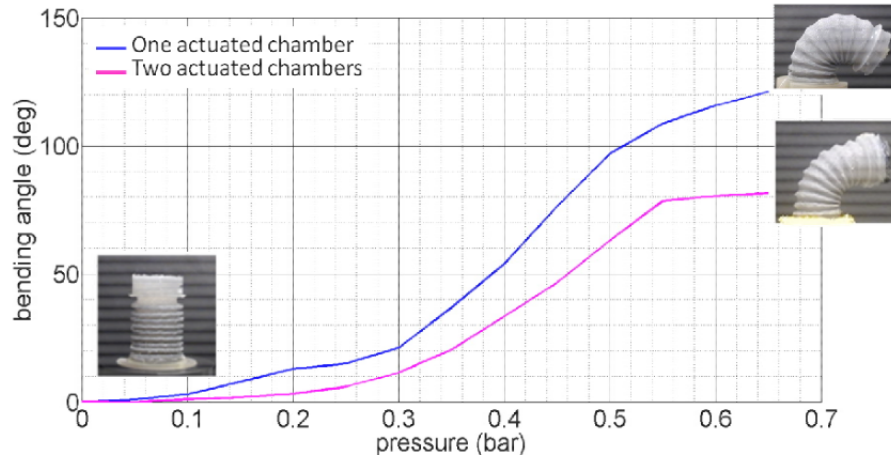
Rysunek 5.1: Rozszerzanie komór pod wpływem wzrostu ciśnienia. [26]

5.1.1 Siła nieproporcjonalna do przyłożonego ciśnienia

Siła działająca w komorze jest iloczynem pola powierzchni i ciśnienia panującego wewnątrz komory. Ze wzrostem ciśnienia rośnie pole, zatem zależność siły odkształcającej Stiff-Flopa od ciśnienia na wejściu nie jest liniowa. Efekt ten znajduje odzwierciedlenie w badaniach przeprowadzonych przez konsorcjum, (Rys. 5.2). Widać że w początkowej fazie zależność jest kwadratowa (pole powierzchni komory jest proporcjonalne do ciśnienia oraz siła jest równa wartości ciśnienia pomnożonego przez wartość pola powierzchni na którą to ciśnienie działa, zatem siła uginająca manipulator jest proporcjonalna do drugiej potęgi wartości ciśnienia w komorze). Pod koniec zakresu czułość manipulatora zdecydowanie spada i jest to prawdopodobnie spowodowane nieliniowymi właściwościami zewnętrznego zbrojenia.

5.1.2 Zależność kształtu manipulatora od kolejności aktywacji komór

Zwiększenie ciśnienia w komorze powoduje zmianę jej wymiarów w każdym kierunku, konsekwencją czego jest powstanie kontaktu pomiędzy materiałem oplotu a silikonem. Powstałe w ten sposób tarcie skutecznie hamuje powiększenie sąsiedniej komory po napełnieniu jej takim samym ciśnieniem. Sytuacja ta została zobrazowana na rysunku 5.3. W stanie początkowym (1), ciśnienie w komorach jest ciśnieniem atmosferycznym. Pomiędzy materiałem oplotu a silikonem istnieje luz. Następuje napełnienie komory (2),



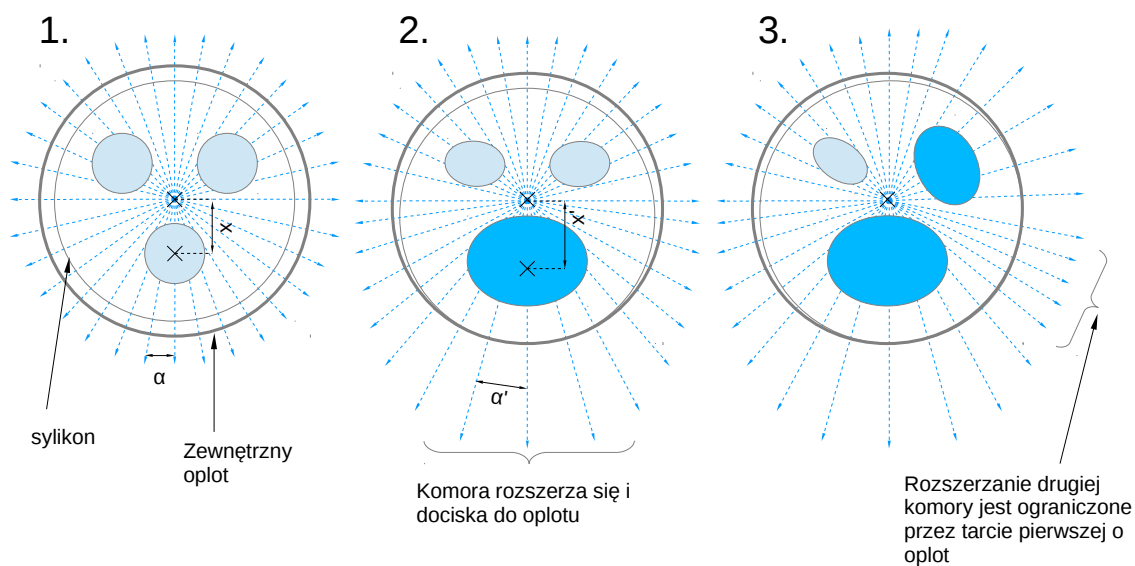
Rysunek 5.2: Zależność kąta ugięcia manipulatora od ciśnienia w komorach. [26]

w konsekwencji czego, odkształcony silikon zostaje przyciśnięty do oplotu. Napełnienie kolejnej komory (3) przynosi mniejszy efekt, ponieważ ciśnienie w drugiej komorze działa przeciwko ciśnieniu w pierwszej i siłom tarcia już istniejącym pomiędzy pierwszą komorą i owijką.

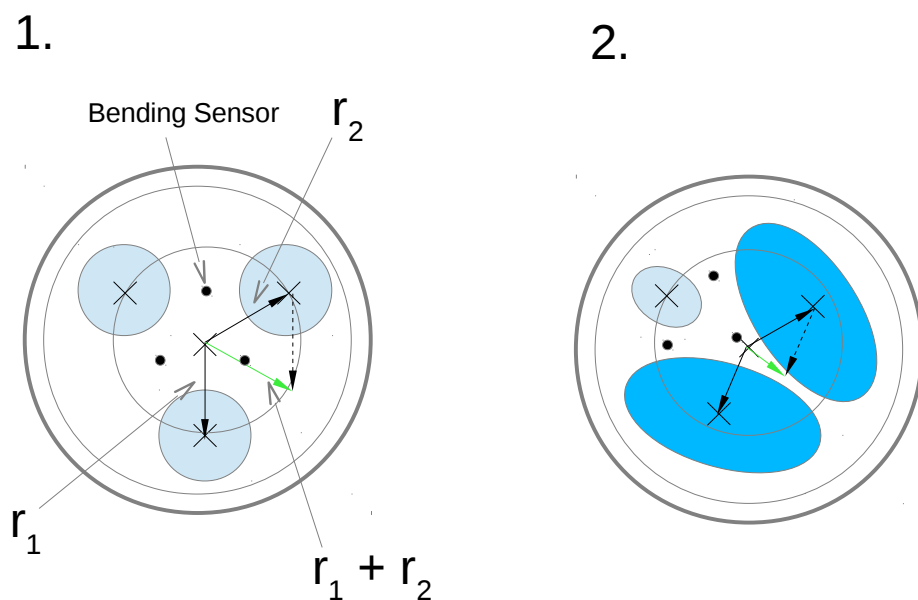
5.1.3 Przesunięcie geometrycznego środka ciężkości przekroju komory

Aktywacja równolegle dwóch komór powoduje mniejsze ugięcie manipulatora niż aktywacja tylko jednej komory (Rys. 5.2). Efekt ten jest zupełnie nieintuicyjny, wydawałoby się, że aplikacja ciśnienia do dwóch komór na raz powinna spowodować mocniejsze ugięcie. W rzeczywistości, przy założeniu stałości geometrii przekroju manipulatora, moment gnący w obu przypadkach powinien być taki sam, jednak siła rozciągająca manipulator jest dwukrotnie większa. W konsekwencji uzyskana krzywizna powinna mieć taki sam promień, ale manipulator powinien być dłuższy, co za tym idzie, kąt ugięcia powinien być większy. Mniejsze ugięcie manipulatora jest spowodowane zmianą geometrii przekroju (Rys. 5.4). Napełnienie dwóch komór powoduje, że ich kształt zmienia się nie symetrycznie. Wektor momentu gnącego spowodowanego ciśnieniem w komorze jest wynikiem mnożenia wektora siły (spowodowanej tym ciśnieniem) oraz promienia łączącego geometryczny środek ciężkości przekroju komory. W efekcie napełniania komór, ich środki ciężkości przesuwają się w taki sposób, że suma wektorowa momentów gnących zmniejsza się w stosunku do przypadku z nie przesuniętymi środkami. Zatem moment gnący jest mniejszy niż w przypadku aktywacji pojedynczej komory.

Oprócz zmiany wartości momentu gnącego, zmiana geometrii przekroju powoduje



Rysunek 5.3: Proces rozszerzania komór wewnątrz owijki i wpływ kolejności zasilania komór na ich przekrój poprzeczny.



Rysunek 5.4: Zmiany geometrii przekroju na skutek rozszerzania się komór.

także zmianę kształtu sensorów długości (Rys. 5.4), co zostało dokładniej omówione w paragrafie 5.2.

5.1.4 Proponowane zmiany

W celu poprawy jakości pomiaru oraz kontroli manipulatora zaproponowane zostały zmiany w konstrukcji pozwalające na ograniczenie opisanych powyżej efektów. Problem z powiększaniem się komór został zinterpretowany jako problem powstającego pęcherza na zewnątrz manipulatora i to zostało zredukowane. Prawdziwym problemem jest powiększanie się komory, niezależnie od kierunku w którym następuje ekspansja. Problem powinien zostać rozwiązany poprzez nałożenie ograniczeń na każdą z komór osobno, nie na cały manipulator. Zastosowanie osłony w obecnej formie (pleciony rękaw) nie było możliwe ze względu na technologię jej wytwarzania, a ponadto wprowadzałoby niepotrzebne zakłócenia (interakcja pomiędzy włóknami podczas odkształcania modułu). Zaproponowanym rozwiązaniem jest tworzenie opłotu z pojedynczej nici, na przygotowanej specjalnie do tego celu cylindrycznej silikonowej powierzchni. Tak utworzona spirala o odpowiednio małym skoku może być potraktowana jako niezależne okręgi z nici, i jej wpływ na odkształcenie można pominąć, podczas gdy obecna osłona niewątpliwie ma wpływ na odkształcenie. W ten sposób przygotowaną strukturę należy umieścić we formie i tak przygotowaną formę wypełnić silikonem. Zaproponowana technologia oraz rozwiązanie konstrukcyjne zostały przetestowane w PIAP w celach demonstracyjnych (Rozdział 6). Powiększanie się komory zostało zredukowane. Nie stwierdzono wpływu zbrojenia na pozostałe właściwości manipulatora.

5.2 Sensor długości

W związku z problemem odkształcania się komór (rozdział 5.1), zmienia się położenie włókien w module. Co za tym idzie, zmiana długości którą jest mierzona spowodowana jest nie tylko faktycznym wydłużeniem liniowym modułu na długości sensora, ale także “wybrzuszeniem” komory. Innym problemem jest fakt, że konstrukcja sensora długości jest bardzo podatna na powstawanie histerezy. Podczas zmniejszania się długości modułu, światłowód jest pchany w silikonowym kanale, Znaczne tarcie, oraz konieczne do działania systemu luzy, powodują, że nie cofa się on do swojej początkowej pozycji. Zaproponowane zostało wprowadzenie napięcia wstępnego w postaci sprężyny naciągającej wychodzącej z dołu włókno, i rozwiązanie to zostało z powodzeniem wprowadzone do konstrukcji sensora, zmniejszając histerezę do poziomu poniżej wartości szumu pomiaru.

Dokładniejsze badania obu wersji zostały przeprowadzone przez partnera projektu i nie zostały jeszcze udostępnione.

5.3 Sensor siły i momentów

Oprócz problemów ze znaczną histerezą i bezwładnością sensora dużym problemem okazała się jego kalibracja. Sensor został dostarczony przez konsorcjanta bez takiej kalibracji, oraz bez żadnej instrukcji kalibracji. Metoda pomiaru siły i momentów gnących polega na pomiarze wartości ugięcia trzech podatnych belek rozmieszczonych na planie trójkąta, i przeliczaniu tych wartości na wartości momentów w osiach OX i OY , oraz siły w osi OZ . problem polega na tym że konstrukcja sensora nie jest symetryczna względem osi x i osi y 2.2.4, zatem działanie nawet czystego momentu skręcającego względem dowolnej osi powoduje zawsze ugięcie wszystkich trzech belek. Zaproponowana została modyfikacja belek, tak by ich kształt był symetryczny. Rozwiązanie takie zostało wprowadzone w projekcie, a charakterystyka sensora uległa znacznej poprawie.

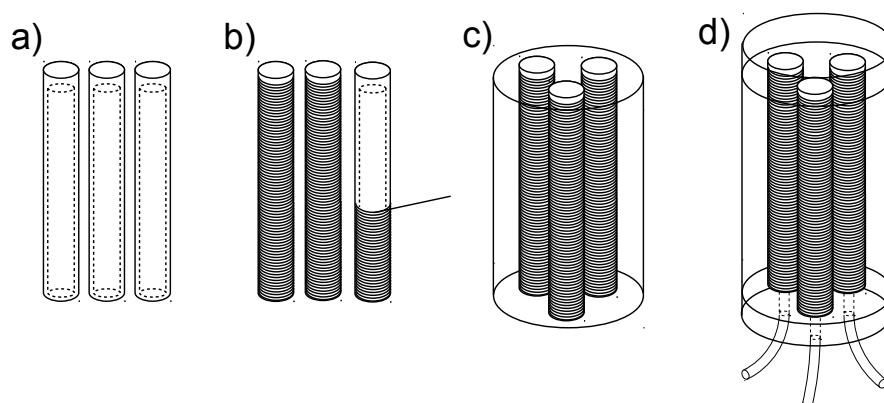
Rozdział 6

Nowa konstrukcja

Zaproponowana w sekcji 5.1.4 zostały zmiany zaimplementowane i przetestowane w celach demonstracyjnych. Opisane w niniejszym rozdziale rozwiązania konstrukcyjne oraz technologiczne zostały zgłoszone do urzędu patentowego (wnioski o numerach P.409880 oraz P.409670), oraz opisane w publikacji [33].

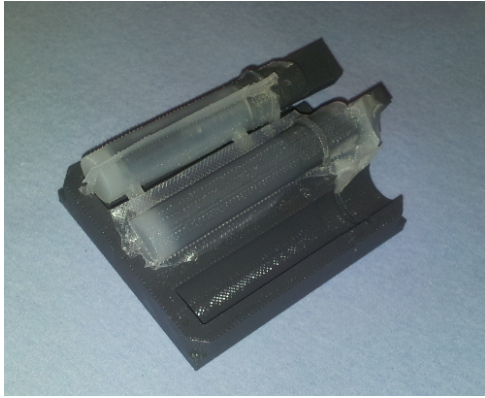
6.1 Technologia wytwarzania

Proces wytwarzania pojedynczego modułu manipulatora z zaproponowanymi modyfikacjami składa się z kilku etapów (Rys. 6.1). Pierwszym etapem jest wytworzenie cienkościennych walców silikonowych które posłużą jako wewnętrzne ściany komór aktywacyjnych (Rys. 6.2a).



Rysunek 6.1: Proces wytwarzania zbrojenia wokół komór aktywacyjnych.

Uzyskane walce są następnie pokrywane pojedynczą nicią (Rys. 6.2b) i umieszczane w formie służącej do odlewu całego modułu (Rys. 6.3). Budowa rdzeni komór po-

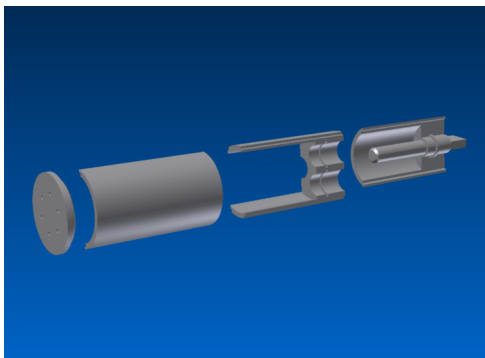


(a) Cienkościenne silikonowe cylindry bezpośrednio po wyjęciu z formy, przed usunięciem pozostałości po odlewaniu.

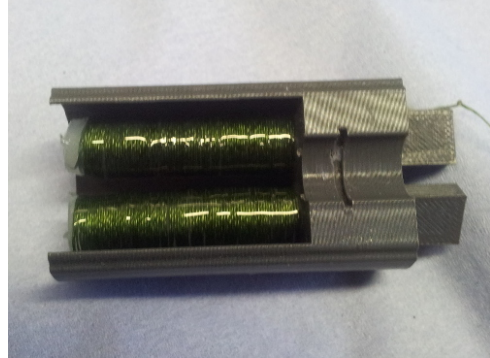


(b) Cylindry po nałożeniu zbrojenia.

Rysunek 6.2: Proces produkcji komór.



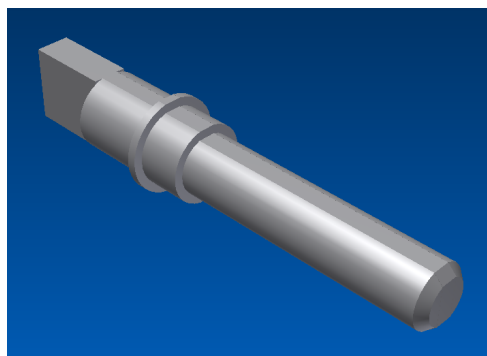
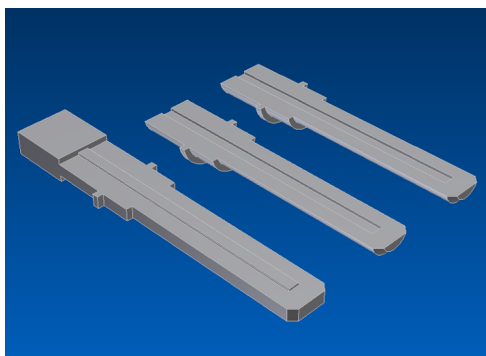
(a) Model CAD formy.



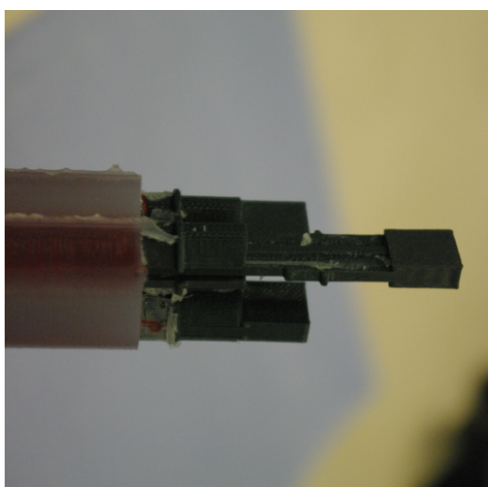
(b) Forma z przygotowanymi komorami.

Rysunek 6.3: Forma z przygotowanymi komorami.

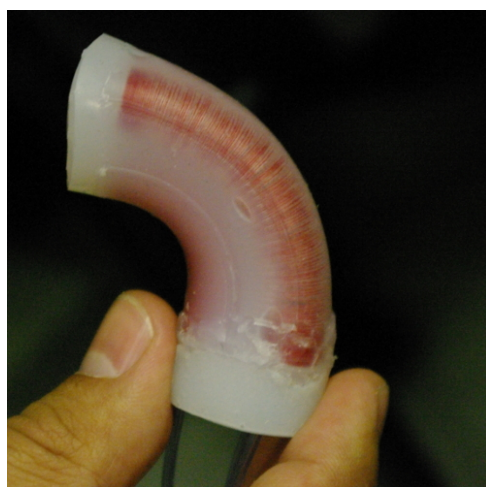
dyktowana jest koniecznością usunięcia rdzeni po dokonaniu odlewu. Nanoszenie opłotu na podatny silikon wprowadza dodatkowe naprężenia i potęguje wartość siły tarcia pomiędzy powierzchnią rdzenia i powierzchnią komory. Usunięcie rdzenia w całości nie jest możliwe bez uszkodzenia silikonu. Zastosowana konstrukcja pozwala na usunięcie wewnętrznej części rdzenia (tarcie pomiędzy sztywnymi częściami rdzenia, który nie jest tak podatny na uszkodzenia jak powierzchnia silikonowa) a następnie pozostałych części. Po usunięciu środkowej części, powstaje luz, dzięki czemu pozostałe można usunąć bez przeszkód. Proces usuwania rdzeni pokazano na Rys. 6.5a. Po usunięciu wszystkich elementów formy, moduł jest zamykany od góry i od dołu twardym silikonem, oraz mocowane są przewody zasilające. Gotowy efekt został przedstawiony na rysunku 6.5b.



Rysunek 6.4: Rdzeń formy odlewniczej formujący wewnętrzną powierzchnię komory.



(a) Proces usuwania części środkowej rdzenia. Zewnętrzne części nie przemieszczają się i chronią delikatną strukturę komór.



(b) Prototyp manipulatora ze zbrojeniem wewnętrznym, widoczne włókno zbrojenia.

Rysunek 6.5: Usuwanie formy, oraz gotowy prototyp.

Opisany powyżej sposób wytwarzania jest pierwszą metodą opracowaną do celów implementacji zbrojenia komór. Kolejna iteracja tego procesu różni się znacznie od opisywanego, jednak ze względu na to że nie została ona jeszcze zgłoszona w urzędzie patentowym, nie może zostać ujawniona w niniejszej pracy.

6.2 Testy

Wykonane zostały testy proponowanego rozwiązania, a uzyskane charakterystyki porównane z oryginalną konstrukcją.

6.2.1 Charakterystyka ciśnieniowa

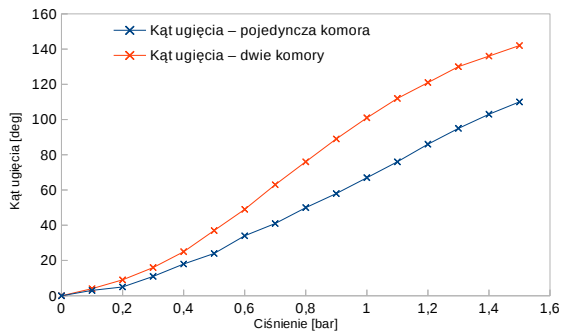
Charakterystyka ciśnieniowa została zmierzona za pomocą stanowiska pomiarowego składającego się z kompresora, proporcjonalnego zaworu, cyfrowego manometru oraz aparatu cyfrowego ustawionego w taki sposób, że płaszczyzna ogniskowania była prostopadła do płaszczyzny ugięcia manipulatora, oraz oś optyczna obiektywu przechodziła przez punkt w którym znajdował się wierzchołek manipulatora przed rozpoczęciem badania (Rys. 6.6). Podczas badania, zachowanie manipulatora było rejestrowane za pomocą aparatu podczas powolnych zmian ciśnienia od wartości ciśnienia atmosferycznego aż do pewnej wartości granicznej. Następnie nagrany materiał został przeanalizowany, oraz co pewną ustaloną wartość ciśnienia dokonano pomiaru kąta pochylenia górnej płaszczyzny manipulatora używając programu graficznego. Przetestowane zostały przypadki aktywacji jednej, dwóch oraz trzech komór na raz. Podczas aktywacji trzech komór na raz, badane było wydłużenie modułu. Charakterystyki modułu oryginalnego oraz wytworzonego w PIAP przedstawione zostały na wykresach (rysunek 6.7). Jak widać charakterystyka nowej konstrukcji nie jest liniowa, jednak zbliżona do liniowej w porównaniu z charakterystyką oryginalnego modułu. Jak pokazują wyniki, aktywacja modułu wykonanego w ramach tej pracy wymaga dużo większych ciśnień, jednak jest to rezultat zastosowania innej geometrii przekroju, oraz jej niezmienności w funkcji ciśnienia.



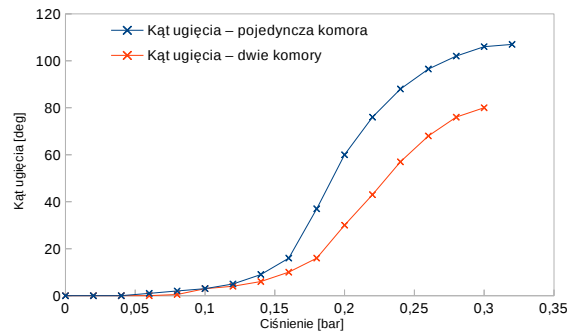
Rysunek 6.6: Pomiary charakterystyki ciśnieniowej modułu. (Widoczny manometr analogowy nieużywany w doświadczeniu.)

6.2.2 Charakterystyka objętościowa

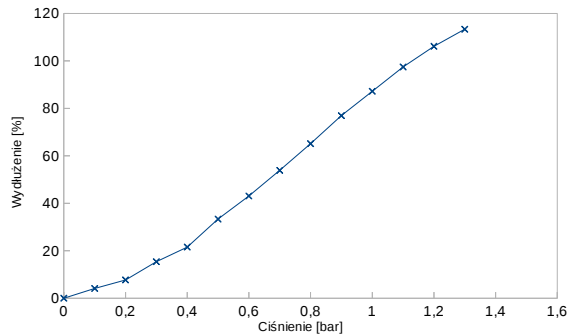
W celu ustalania charakterystyki manipulatora w funkcji objętości wtłoczonej cieczy roboczej, płyn aktywacyjny został wymieniony z powietrza na wodę. Woda jest mało ściśliwa, i jej zmianę objętości dla testowanych ciśnień można całkowicie pominąć, ponieważ jest wiele rzędów mniejsza niż dokładność pomiaru ($0.452GPa^{-1}$, [34]). Podczas



(a) Ugięcie, PIAP



(b) Ugięcie, oryginalna konstrukcja

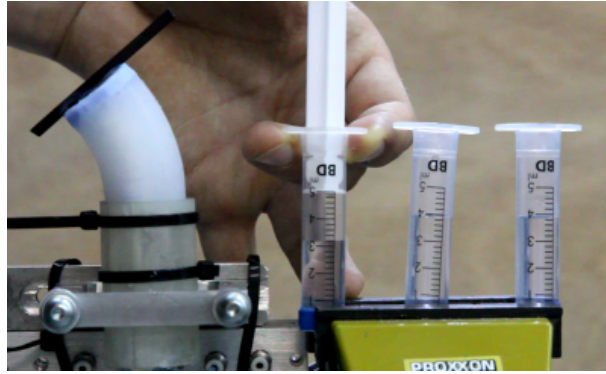


(c) Wydłużenie, PIAP

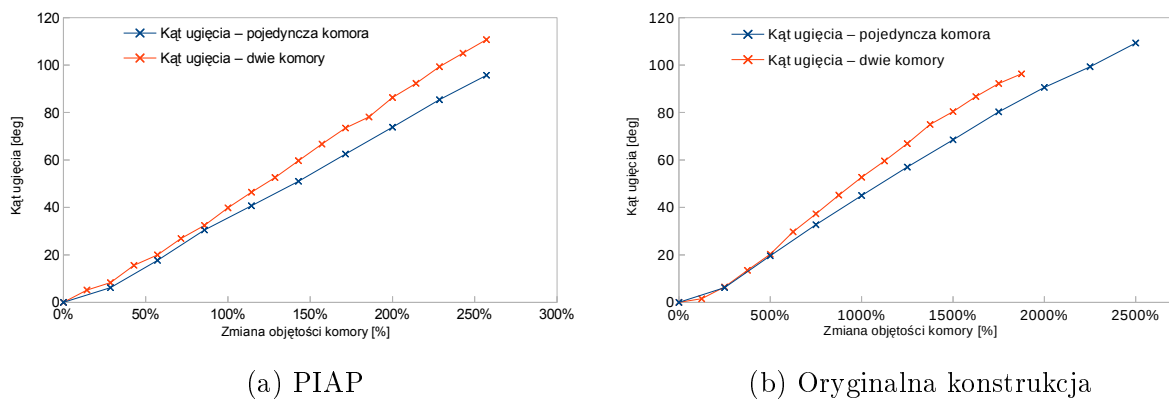
Rysunek 6.7: Porównanie charakterystyk ciśnieniowych manipulatorów.

pomiaru, manipulator zasilany był za pomocą strzykawki z podziałką co 0.1ml (Rys. 6.8). Dane pomiarowe zostały przedstawione na wykresie (Rys. 6.9). Dla porównania analogicznie doświadczenie zostało przeprowadzone dla oryginalnego manipulatora. Warto zwrócić uwagę, że zależność ugięcia od objętości jest względnie liniowa dla obu konstrukcji, jednak objętość potrzebna do ugięcia oryginalnej konstrukcji jest o rząd wielkości większa niż konstrukcji proponowanej przez autorów. Pomimo w przybliżeniu liniowego zachowania poprzedniej wersji modułu, charakterystyka proponowanego rozwiązania jest wyraźnie bardziej liniowa. Wartości uwagi jest też fakt, że spoczynkowa objętość komór w obu manipulatorach jest zbliżona i w przybliżeniu równa 0.7ml.

Podczas testów mierzona była także zmiana objętości pasywnych komór. Wyniki potwierdzają hipotezę o rozszerzaniu się komór wewnątrz zbrojenia oryginalnej wersji manipulatora, oraz potwierdzają brak ekspansji komór w proponowanej konstrukcji. Podczas aktywacji pojedynczej komory manipulatora w zewnętrznym zbrojeniu obserwujemy spadek objętości pozostałych komór, oraz nasycenie dla końcowego fragmentu zakresu aktywacji. Może to być spowodowane całkowitym zamknięciem pozostałych komór (wypchnięta objętość jest porównywalna ze spoczynkową objętością komory). W nowej konstrukcji obserwujemy przyrost objętości pasywnych komór, proporcjonalny do



Rysunek 6.8: Pomiary charakterystyki objętościowej modułu.



Rysunek 6.9: Porównanie charakterystyk objętościowych manipulatorów.

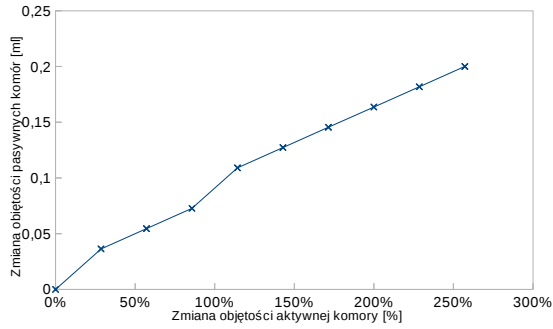
przyrostu objętości aktywowanej komory (Rys. 6.10).

6.2.3 Charakterystyka ciśnieniowo-objętościowa

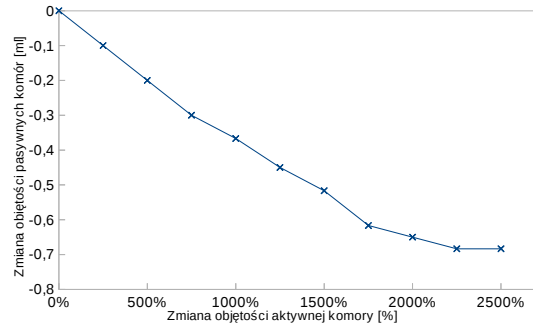
Na podstawie danych uzyskanych w doświadczeniach 6.2.1 i 6.2.2 możliwe jest uzyskanie zależności objętości komory w funkcji ciśnienia. Zmiana objętości w zaproponowanej konstrukcji w pełnym zakresie aktywacji wynosi około 2.5 ml. Aktywacja dwóch komór równoległe prowadzi do większej zmiany objętości na komorę niż aktywacja pojedynczej komory (Rys. 6.11).

6.2.4 Testy na rozciąganie i zgianie

W celu oszacowania wpływu zbrojenia na pasywne właściwości mechaniczne manipulatora (zachowanie przy działaniu zewnętrznego wymuszenia), wykonany został pojedynczy moduł niezawierający zbrojenia wokół komór. Testy przeprowadzono zadając siłę za pomocą precyzyjnego siłomierza, oraz mierząc odkształcenie za pomocą aparatu

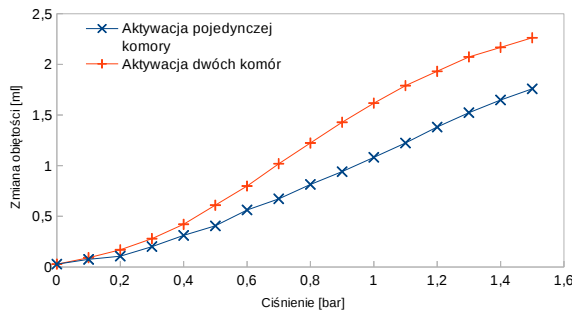


(a) PIAP



(b) Oryginalna konstrukcja

Rysunek 6.10: Zmiana objętości pasywnych komór w funkcji zmiany objętości aktywnej komory.

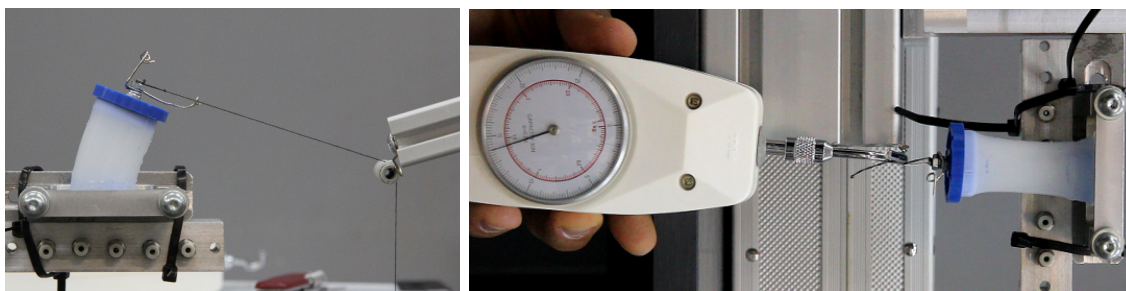


Rysunek 6.11: Zmiana objętości aktywowanej komory w funkcji ciśnienia, nowa konstrukcja.

fotograficznego (Rys 6.12, metodą jak w 6.2.1). Na wykresach 6.13 przedstawione zostało odkształcenie w funkcji wartości siły dla manipulatora zbrojonego i niezbrojonego. Siła powodująca ugięcie była zadawana zawsze w tym samym kierunku w układzie współrzędnych wierzchołka modułu (Rys. 6.12a). Widać, że różnice są małe i mogą wynikać z niedokładności wykonania prototypów. W celu dokładniejszego określenia wpływu zbrojenia konieczne jest powtórzenie doświadczenia na większej próbie, jednak ze względu na ograniczenia czasowe nie było to możliwe.

6.2.5 Wyniki

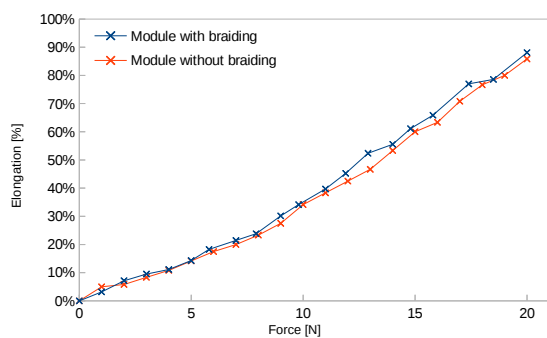
Zaproponowane rozwiązanie ogranicza najpoważniejsze problemy występujące w tradycyjnej konstrukcji. Efekt powstawiania zewnętrznego pęcherza nie występuje, a geometria przekroju jest stała (nie zmienia się pole powierzchni przekroju komory) Przeprowadzone doświadczenia pokazują, że zachowanie manipulatora o zmodyfikowanej konstrukcji jest także bardziej liniowe niż zachowanie manipulatora oryginalnego. Zastoso-



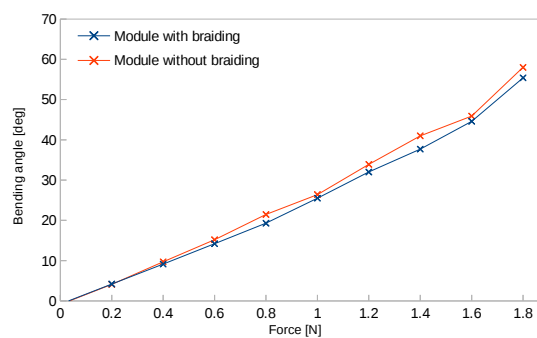
(a) Sposób pomiaru ugięcia.

(b) Sposób pomiaru wydłużenia.

Rysunek 6.12: Sposób pomiaru odkształcenia w funkcji wartości zewnętrznej siły.



(a) Testy wydłużenia.



(b) Testy ugięcia.

Rysunek 6.13: Porównanie właściwości pasywnych.

wanie wewnętrznego zbrojenia pozwala odrzucić zbrojenie w dotychczasowej formie, co czyni manipulator dużo przyjaźniejszym dla ciała człowieka (gładka powierzchnia) oraz umożliwia zainstalowanie czujników taktylnych bezpośrednio na powierzchni modułu, co nie było do tej pory możliwe. Zachowanie manipulatora jest też jakościowo zgodne z przewidywaniami modelu fizycznego (Rys. 3.2)

Rozdział 7

System fuzji danych

7.1 Istota fuzji danych

Medyczne zastosowanie systemu Stiff-Flop implikuje ścisłe wymagania dotyczące bezpieczeństwa – każde narzędzie medyczne musi wykazywać się wysoką niezawodnością. Zapewniane jest to przez wysoki stopień redundancji osiągnięty przez wykorzystanie danych z wielu różnych sensorów. Ograniczenie materiałów podsystemów do niemetali w celu zachowania możliwości jednoczesnego stosowania rezonansu magnetycznego wymusza zastosowanie nowatorskich czujników oraz nowych, adekwatnych algorytmów i koncepcji fuzji danych.

Fuzją danych określa się proces łączenia danych lub informacji pochodzących z różnych źródeł w celu estymacji lub przewidywania stanu obiektu [35]. Pozwala on na osiągnięcie lepszych efektów przy wykorzystaniu wielu niezależnych sensorów. Cechą charakterystyczną tego procesu jest łączenie informacji pochodzących z sensorów w taki sposób, żeby wynik miał większą jakość niż gdyby uzyskany był przy pomocy każdego sensora z osobna.

7.2 Sposoby obliczania konfiguracji

Niektóre z urządzeń dostępnych w systemie Stiff-Flop dają bezpośrednią informację o położeniu pewnych punktów manipulatora. Zastosowanymi sensorami tego typu w projekcie Stiff-Flop jest czujnik położenia absolutnego *Aurora*. Zasada jego działania opiera się na modulacji generowanego pola magnetycznego, przez co jego markery nie muszą być widoczne. Dzięki temu, można je zamocować w kluczowych punktach robota i bezpośrednio mierzyć ich pozycję. Ponieważ deformacja manipulatorów miękkich może

zachodzić w dowolnym punkcie ich objętości, sensor ten jest bardzo przydatny w badaniach z tej dziedziny.

Zastosowanie systemu Aurora jest rozwiązaniem tymczasowym – docelowo, informacje po położeniu absolutnym mają być dostarczane przez system wizyjny. Bazuje on na obrazie z kamery endoskopowej wprowadzanej do pacjenta wraz z manipulatorem. Z uwagi na charakter środowiska pracy manipulatora, jego widoczność z perspektywy kamery może być tylko częściowa. W takich wypadkach system wizyjny dostarczać będzie jedynie informacji o położeniu fragmentu robota. Z tego powodu system fuzji danych musi być przystosowany do wykorzystywania pomiarów absolutnych losowych, widocznych w danej chwili fragmentów robota.

W związku z powyższym, aby zapewnić wysoką redundancję wymagane jest użycie sensorów wielkości pośrednich. Estymacja konfiguracji manipulatora na ich podstawie wymaga wykorzystania modeli analitycznych. Modele te bazują na pewnych kompletnych zestawach informacji. Z powodu skomplikowanej konstrukcji robota, do dyspozycji dostępnych jest kilka różnych jego modeli – fizycznych i geometrycznych.

Jedną z metod estymacji konfiguracji manipulatora jest opisany w rozdziale 3.1 model stałej krzywizny. Bazuje on na znajomości długości komór aktywacyjnych, mierzonych przez sensory długości. Model ten zakłada brak działania sił zewnętrznych na manipulator, w związku z tym jego błąd związany będzie z ich wartością.

Głównym przeznaczeniem ramienia Stiff-Flop jest praca w dynamicznym i skomplikowanym geometrycznie otoczeniu. W takich warunkach kontakt robota z obiektami z otoczenia jest wysoce prawdopodobny. Z powodu swojej miękkiej budowy, każda kolizja z otoczeniem skutkuje deformacją jego kształtu. W związku z tym, model stałej krzywizny jest niewystarczający do niezawodnego sterowania robotem.

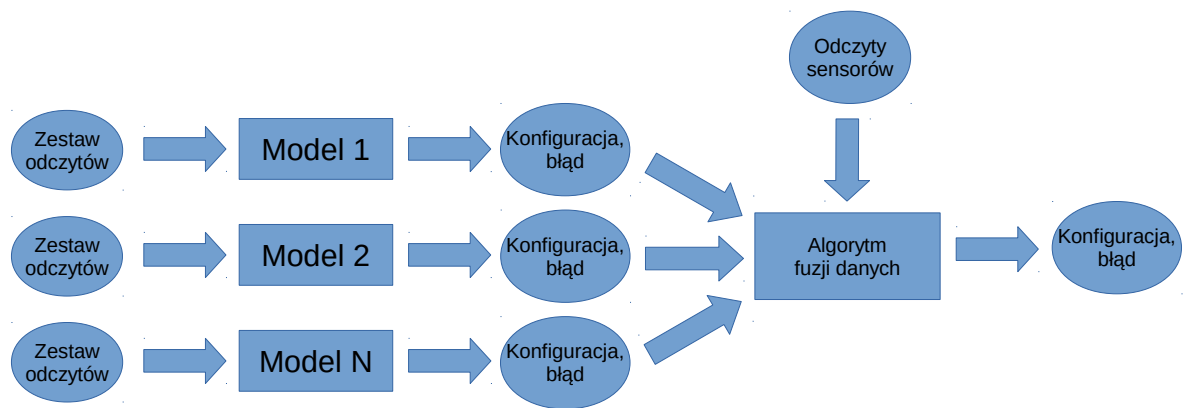
Model fizyczny, opisany w rozdziale 3.2 oparty jest na teorii gięcia, w związku z czym bierze pod uwagę wpływ sił zewnętrznych na kształt manipulatora. Jest drugi model, który został wykorzystany w procesie fuzji danych.

7.3 Pierwsza koncepcja systemu

Pierwsza wersja manipulatora obciążona była pewnymi negatywnymi efektami związanymi z jego aktywacją. Wewnątrz manipulatora zachodziły wtedy zjawiska, które nie są kontrolowane i deterministyczne. Ówczesna konstrukcja komór aktywacyjnych manipulatora sprawiała, że podczas napełniania ich powietrzem zwiększały swoją objętość w sposób niekontrolowany. Rosła ona do tego stopnia, że tworzył się pęcherz. Jego rozrost

powstrzymywano wtedy poprzez zastosowanie zewnętrznej owijki. Rozwiązanie to nie ograniczało jednak występowania tego efektu wewnątrz modułu, co skutkowało pewnymi niepożądanymi efektami, które dokładnie opisane zostały w rozdziale 5. W tym rozdziale przedstawiona została pierwsza wersja systemu fuzji danych, która dostosowana była do przeciwdziałania tym powyższym zjawiskom. Uwzględnia ona jedynie dostępne w chwili jej opracowania sensory.

Podjęciem proponowanym przez autorów pracy jest wykonanie tzw. fuzji wysokiego poziomu. Polega ono na łączeniu informacji przetworzonych już do docelowej postaci. W przypadku estymacji konfiguracji manipulatora, łączone są estymacje obliczone przy pomocy różnych dostępnych modeli. Koncepcję tą przedstawia schemat na rys. 7.1. Prostokątne bloki przedstawiają kolejne etapy przetwarzania informacji, elipsoidalne zaś – zestawy danych.



Rysunek 7.1: Schemat blokowy przedstawiający koncepcję systemu fuzji danych

Zastosowanie wszystkich kompletnych kombinacji danych umożliwiających uzyskanie informacji o aktualnym stanie manipulatora w połączeniu z odpowiednimi metodami obliczeniowymi skutkuje uzyskaniem N estymacji jego konfiguracji wraz z ich błędem. Estymacje te łączone są w bloku fuzji danych, który produkuje ostateczną konfigurację manipulatora. Ogólnie, procedura łączenia n niezależnych informacji o pozycji w postaci punktów $p_i = [x, y, z]$ w przestrzeni trójwymiarowej może być opisana równaniem 7.1.

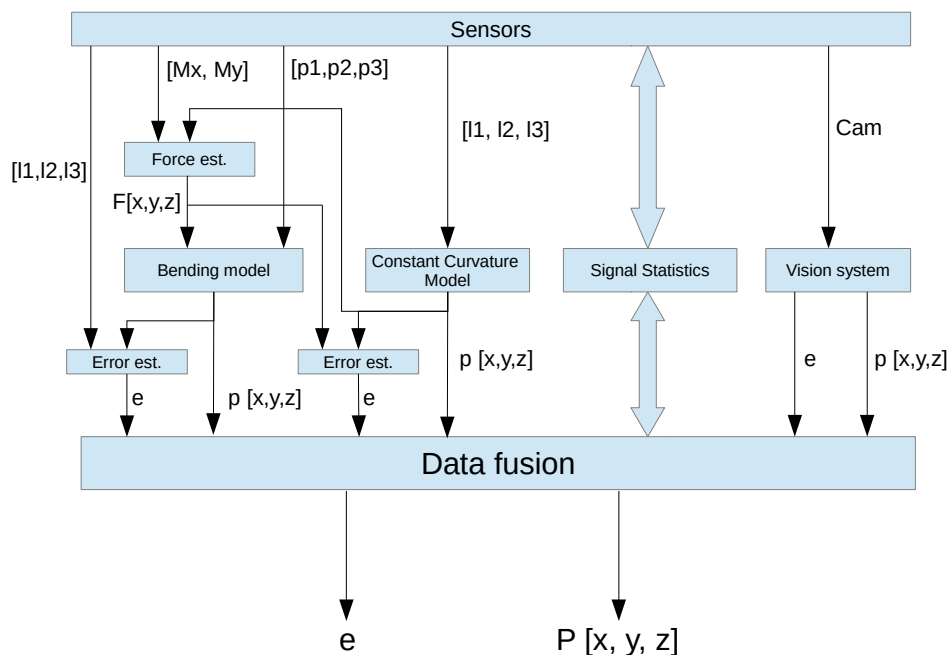
$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i p_i)}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (7.1)$$

Wpływ obliczonej pozycji p_i na końcową estymację określony jest przez współczynnik a_i . Równanie 7.1 stosowane jest na pewnym zbiorze punktów wzdłuż osi symetrii

modułu. Współczynniki obliczane są w czasie rzeczywistym poprzez algorytmy wykorzystujące znajomość zachowania modeli pod wpływem zakłóceń oraz surowe dane z czujników. Błąd końcowej estymacji obliczany jest na podstawie błędów dostarczonych przez metody obliczeniowe.

7.3.1 Implementacja

Algorytm opiera się na informacjach z dostępnych sensorów: momentu, długości oraz kamery wizyjnej [36]. Po pierwsze, dwie estymacje konfiguracji manipulatora uzyskać można wykorzystując dostępne modele: model stałej krzywizny oraz model fizyczny. Bazują one na różnych zestawach danych wejściowych. Ich wyjścia są statystycznie niezależne, tak więc odpowiednia ich fuzja powinna zmniejszyć ogólną niepewność. Błąd każdej estymacji obliczany jest przez osobny algorytm. Schemat blokowy przepływu informacji w systemie fuzji danych przedstawiony został na rys. 7.2.



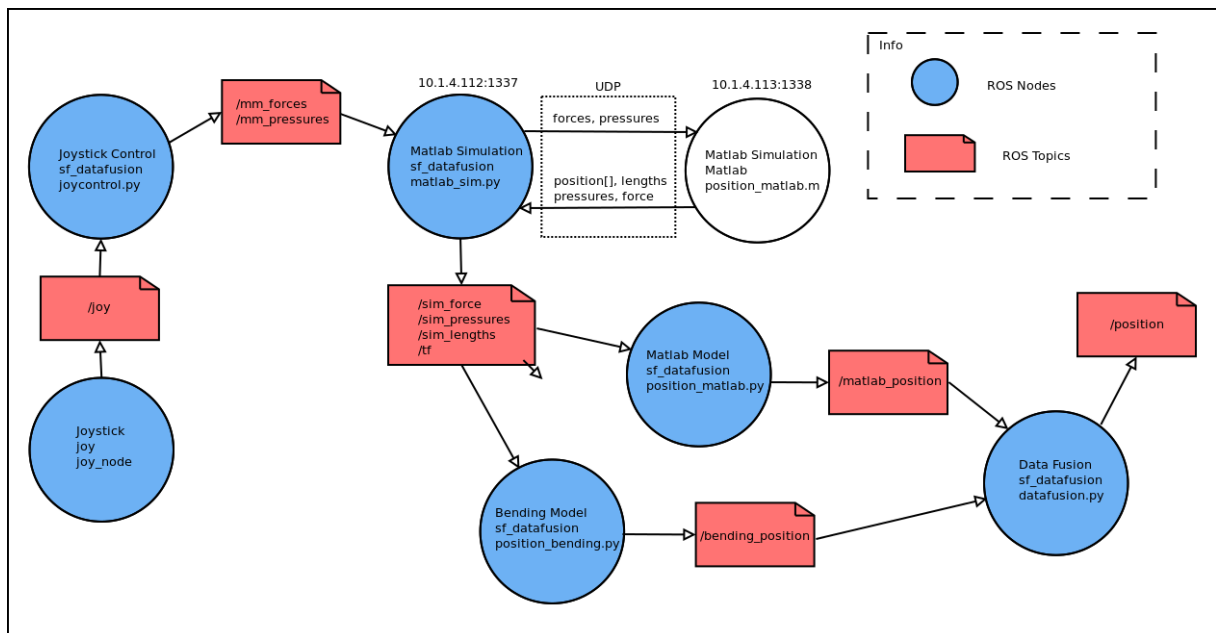
Rysunek 7.2: Schemat blokowy pierwszego systemu fuzji danych

Poziomy blok na górze schematu reprezentuje wszystkie dostępne sensory. Informacje z sensora długości przekazywane są do modelu stałej krzywizny, który oblicza estymowaną konfigurację manipulatora. Pozycja końcówki wyznaczona przez tę konfigurację wykorzystywana jest następnie w bloku fuzji danych oraz bloku aproksymacji siły. Z uwagi na brak dostępności sensora siły, musi być ona aproksymowana przy użyciu dostępnych informacji. Procedura ta przedstawiona jest w rozdziale 7.5.

Siły aproksymowane w ten sposób wykorzystywane są wraz z danymi z czujników ciśnienia w bloku modelu fizycznego. Wynikiem jest kolejna estymacja konfiguracji manipulatora, która jest wykorzystywane przez blok fuzji danych. Precyzja tej estymacji obliczana jest m. in. na podstawie porównania wynikowych długości komórek z ich pomiarem bezpośrednim. Z uwagi na to, że model stałej krzywizny zwiększa swój błąd przy obecności zewnętrznych sił działających na manipulator, jego niepewność obliczana jest na podstawie danych z sensorów momentu. Blok statystyk sygnału dynamicznie oblicza parametry wszystkich sygnałów wejściowych zapewniając algorytmowi fuzji danych informację o ich jakości.

System wizyjny jest trzecim źródłem informacji o pozycji robota. W ciasnym polu operacyjnym jedynie fragment manipulatora jest widoczny na obrazie kamer. Algorytmy przetwarzania tego obrazu dostarczają estymacji pozycji obserwowanych fragmentów wraz z błędem. Dane te są bardzo wartościowe dla algorytmu fuzji, ponieważ konfiguracja obliczona metodami pośrednimi może zostać poprawiona przy użyciu absolutnego pomiaru.

Testowa wersja systemu zaimplementowana została przy użyciu oprogramowania ROS (opisanego w rozdziale 8.2), środowiska Matlab oraz języka python. Wszystkie programy wchodzące w skład systemu oraz połączenia między nimi przedstawione zostały na rys. 7.3.



Rysunek 7.3: Poszczególne programy wchodzące w skład pierwszego systemu fuzji danych

System ten pozwalał na przetestowanie fuzji algorytmu fuzji przy użyciu symulatora zaimplementowanego w środowisku Matlab. Sterowanie symulacją odbywało się przy

pomocy dżojstika. Program *Joystick* otwierał dżojstik za pomocą mechanizmów systemu operacyjnego i udostępniał informację o stanie jego osi i przycisków programowi *Joystick Control*. Wykorzystywał on tę informację do zadawania ciśnień oraz sił zewnętrznych manipulatorowi z symulacji. Komunikacja z symulatorem odbywała się przy pomocy gniazda protokołu UDP poprzez program *Matlab Simulation* pełniący rolę mostka pomiędzy systemem ROS a środowiskiem Matlab. Symulacja obliczała aktualną konfigurację robota na podstawie ciśnień oraz sił i zwracała oprócz niej pomiary z czujników: ciśnienia, sił oraz długości. Informacje te udostępniane były programom będącym implementacjami dwóch dostępnych modeli. Obliczały one konfiguracje manipulatora, które trafiały do końcowego programu *Data Fusion*, dokonującego ich fuzji.

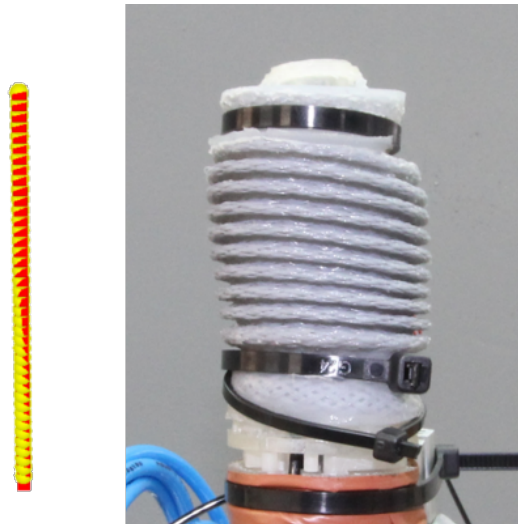
7.3.2 Weryfikacja

W celu weryfikacji jakościowej opracowanej koncepcji systemu fuzji danych przeprowadzone zostały testy. W pierwszym kroku zidentyfikowane zostały interesujące przypadki przy wykorzystaniu dostępnych symulacji. Następnie, przypadki te zostały odtworzone przy pomocy prawdziwego manipulatora. Procedura ta umożliwiła przetestowanie indywidualnych elementów systemu - modeli robota oraz algorytmów fuzji danych w potencjalnie problematycznych sytuacjach [36].

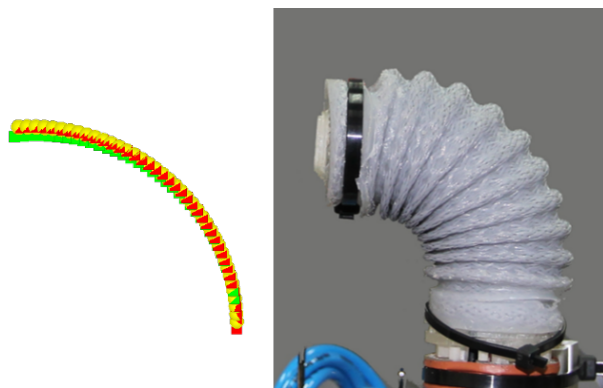
Pierwszym testowanym scenariuszem jest przypadek, w którym ciśnienia w komorach aktywacyjnych są równe. Symulowany i prawdziwy kształt manipulatora przedstawiony został na rys. 7.4. Lewa część rysunku przedstawia trzy chmury punktów reprezentujące „kręgosłupy” modułu obliczone przy pomocy różnych dostępnych metod na podstawie symulowanych danych wejściowych. Czerwone punkty wyznaczone zostały przez algorytm implementujący model stałej krzywizny, zielone – model fizyczny a żółte stanowią końcową estymację systemu fuzji danych. W tym przypadku zaobserwować można, że oba modele jak i fuzja danych zwracają te same wyniki – prosty moduł. Jest to zgodne z kształtem prawdziwego manipulatora przedstawionego po prawej stronie rysunku 7.4.

W kolejnym etapie ustawiono ciśnienie w komorach aktywacyjnych w nierównomierny sposób tak, aby manipulator wygiął się w pewnym kierunku. Sytuacja jest identyczna jak w poprzednim teście – wyniki obu modeli i systemu fuzji są w pełni zgodne z prawdziwym kształtem manipulatora. Moduł wygięty został w fragment okręgu, co przewiduje model stałej krzywizny. Wyniki tego testu przedstawia rys. 7.5.

Rysunku 7.6 i 7.6 przedstawiają wyniki testu przy gięciu modułu w dwóch różnych kierunkach poprzez dodatkowe zadanie zewnętrznej siły. Jej działanie powoduje występowanie różnic pomiędzy modelami. W tym przypadku założenie modelu stałej krzywizny



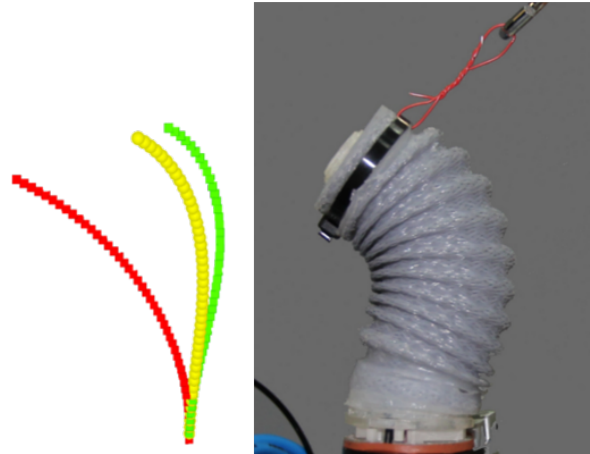
Rysunek 7.4: Przypadek testowy – moduł prosty



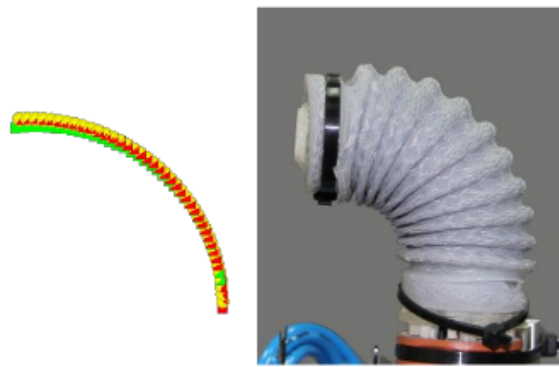
Rysunek 7.5: Przypadek testowy – moduł zginany wyłącznie przez ciśnienia

nie jest spełnione, przez co nie daje on satysfakcjonujących wyników. Jak można zauważyć na rys. 7.6, kształt manipulatora nie jest fragmentem okręgu. Model fizyczny jest bardziej efektywny – wpływ działania zewnętrznej siły jest przez niego uwzględniany. W związku z wykryciem przez sensory jej działania, błąd modelu stałej krzywizny w algorytmie fuzji danych wzrasta, co powoduje zmniejszenie jego wpływu na estymację konfiguracji. Zaobserwować to można na rys. 7.6.

Przeprowadzone eksperymenty pokazują, że efektywność i użyteczność różnych dostępnych modeli robota zmienia się wraz ze zmianą warunków, w związku z wieloma efektami nie uwzględnionymi w modelach. W poprawnym algorytmie fuzji danych, wariacje te muszą zostać uwzględnione. Jednym z kluczowych elementów przedstawionego i testowanego w tym podrozdziale systemu są algorytmy obliczające wpływ wyników każdego z dostępnych modeli na końcową estymację (współczynniki w równaniu 7.1). Mogą one być opracowane ręcznie poprzez wykonywanie wielu testów. Jednym z pomysłów na



Rysunek 7.6: Przypadek testowy – moduł zginany przez ciśnienia oraz zewnętrzną siłę



Rysunek 7.7: Przypadek testowy – moduł zginany wyłącznie przez zewnętrzną siłę

poprawę działania systemu fuzji danych jest zastosowanie sieci neuronowych do wyznaczenia użyteczności danego modelu robota w danych warunkach.

7.4 Druga koncepcja systemu

Postęp w pracach nad różnymi aspektami projektu Stiff-Flop pozwolił na ponowną weryfikację wcześniejszych założeń dotyczących systemu fuzji danych. Od czasu powstania pierwszej jego wersji opracowana i przetestowana przez autorów została nowa konstrukcja manipulatora, która pozbawiona była efektów ubocznych występujących w pierwszej jej wersji. Dodatkowo, po wykonaniu testów sensorów analizie wynikóce, zmianie uległa budowa niektórych z nich. Konsekwencją tego jest zmiana ich zachowania względem zakłóceń. Wszystkie te czynniki spowodowały , że system fuzji danych musiał zostać zaadaptowany do nowego stanu rzeczy.

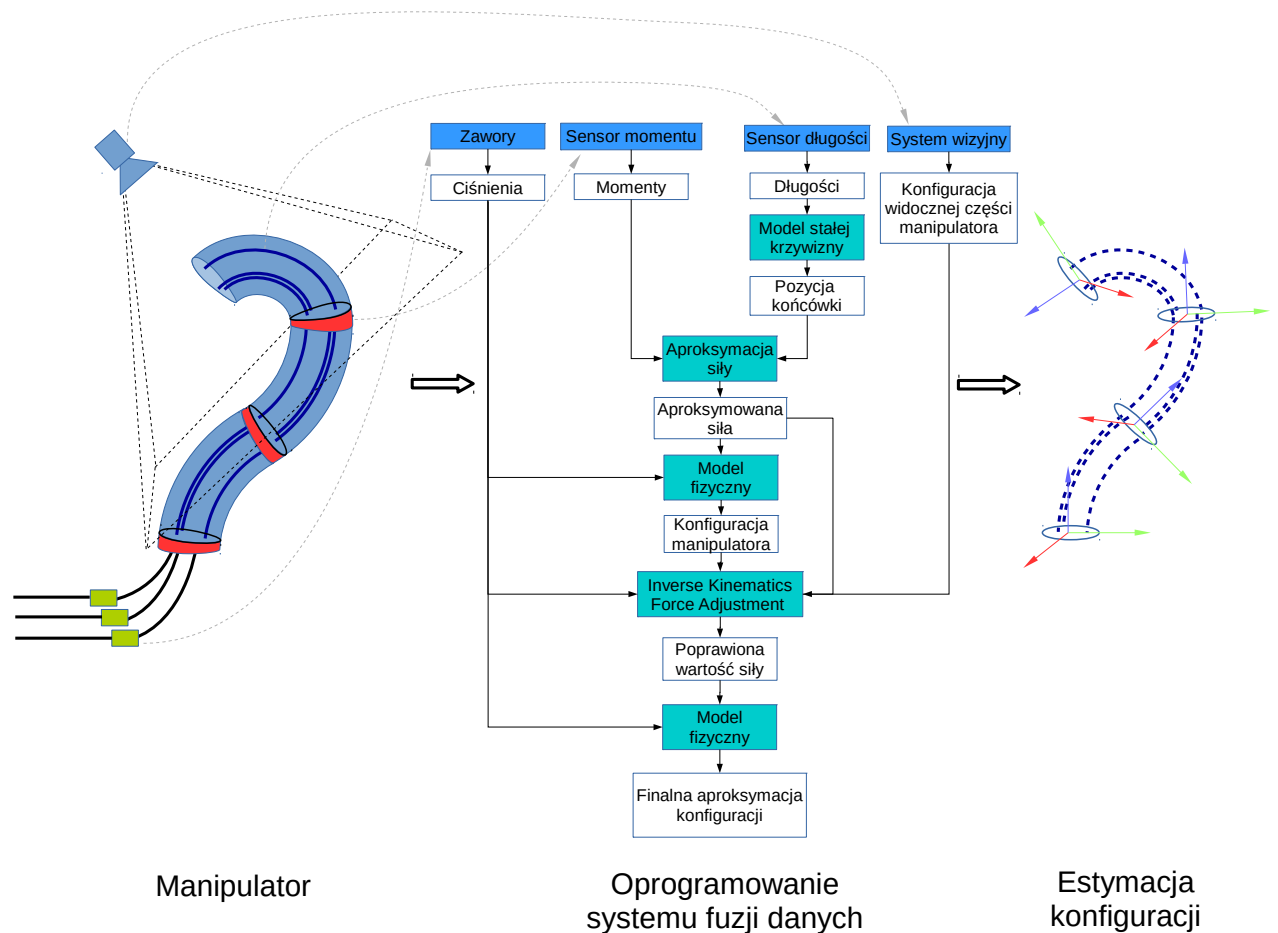
Schemat blokowy drugiej koncepcji systemu fuzji danych przedstawiony jest na

rys. 7.8. Na schemacie widoczny jest przepływ informacji dążący do obliczenia aproksymacji stanu robota. Dane wejściowe pochodzą z czterech dostępnych sensorów: kamery i sensorów ciśnień, momentu oraz długości. Podobnie jak w pierwszej wersji systemu, wykorzystywane są dwa modele manipulatora: fizyczny oraz stałej krzywizny. Drugi z nich pełni jednak rolę pomocniczą - służy tylko i wyłącznie do aproksymacji wartości siły działającej na końcówkę robota. Wyniki obu modeli pokrywają się przy braku sił zewnętrznych. W tym przypadku, jedyną korzyścią z zastosowania modelu stałej krzywizny byłoby większa dokładność i stosunek sygnału do szumu sensora długości. Niestety, pomiar przy użyciu tego sensora jest problematyczny, z uwagi na ciągłą potrzebę kalibracji. Również jakość sygnału nie była zadowalająca. W związku z powyższym, druga wersja systemu fuzji danych nie będzie go wykorzystywać w momencie, w którym dostępna będzie inna metoda aproksymacji położenia końcówki manipulatora (np. system *Aurora*).

Informacja o aproksymowanej wartości siły w połączeniu z wartościami ciśnień w komorach aktywacyjnych jest wykorzystana do obliczenia wstępnej estymacji konfiguracji manipulatora przy pomocy modelu fizycznego. W kolejnym kroku wykorzystywane są dane z systemu wizyjnego. Korzystając z algorytmu kinematyki odwrotnej, przedstawionego w rozdziale 4, poprawiana jest aproksymowana wartość siły. Odbywa się to poprzez taki dobór ciśnień i wartości siły, aby otrzymać konfigurację manipulatora dopasowaną do punktów wykrytych przez system wizyjny. Wcześniejsze obliczanie wstępnej konfiguracji wykorzystywane jest jako punkt startowy algorytmu odwrotnej kinematyki. Wykorzystując aktualne wartości ciśnień oraz poprawioną wartość siły finalna estymacja konfiguracji jest obliczana ponownie przez model fizyczny.

7.5 Aproksymacja siły

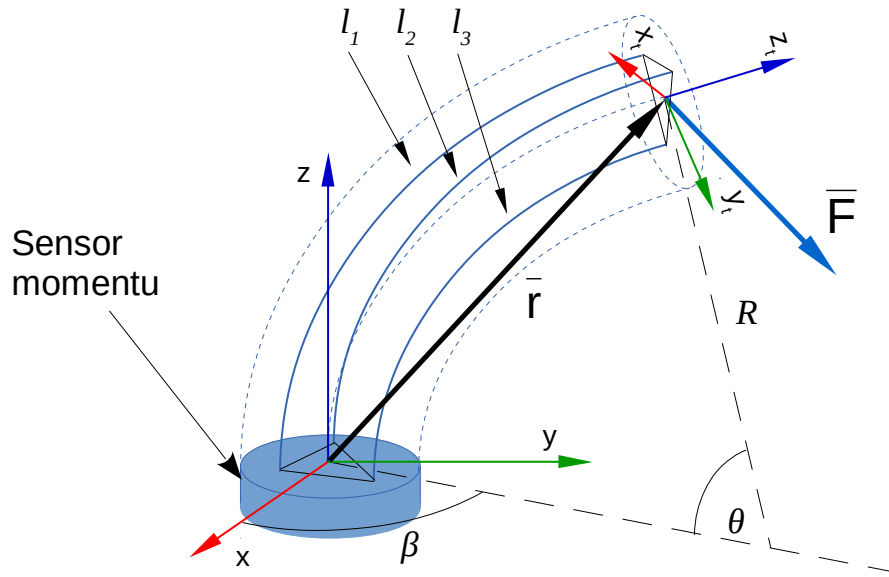
W trakcie wykonywania badań przedstawionych w pracy niedostępne były jeszcze sensory bezpośrednio dostarczające informacji o wartości i punkcie przyłożenia zewnętrznych sił działających na robota, które są niezbędne do obliczeń modelu fizycznego. W związku z tym, istotnym elementem obu wersji systemu fuzji danych jest aproksymacja wartości tych sił na podstawie dostępnego sensora momentu. Budowa tego sensora pozwala na pomiar momentów gnących w osi x i y oraz sumie sił działających w osi z . W tym celu, w trakcie testów systemu fuzji danych w warunkach działania zewnętrznej siły ustalano, że przykładana jest ona w końcówce robota. Kierunek i wartość siły można wtedy obliczyć wykorzystując odczyty z sensora momentu oraz pewną aproksymację położenia końcówki.



Rysunek 7.8: Schemat blokowy drugiej koncepcji systemu fuzji danych

W czasie, kiedy powstawała pierwsza wersja systemu, jedyną informację o położeniu końcówki, różną od ciśnień i sił na których bazuje model fizyczny, stanowiły długości komór. Są one informacją wystarczającą do przybliżonego odtwarzania konfiguracji manipulatora przy użyciu modelu stałej krzywizny. W miarę możliwości, do aproksymacji położenia końcówki wykorzystany będzie bezpośredni jej pomiar przy pomocy sensora magnetycznego *Aurora*. Sposób wykorzystania informacji o położeniu końcówki do aproksymacji siły przedstawia rys. 7.9.

Moment gnący M względem podstawy modułu wywołany siłą \vec{F}^i można określić przy pomocy równania 7.2:



Rysunek 7.9: Sposób wykorzystania informacji o położeniu końcówki robota

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

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

gdzie wektor \vec{r} jest ramieniem działania siły \vec{F} w układzie współrzędnych sensora momentu. Wzór 7.2 można przepisać do następującego układu równań:

$$\begin{cases} -zF_y + yF_z = M_x \\ zF_x - xF_z = M_y \\ -yF_x + xF_y = M_z \end{cases} \quad (7.3)$$

W układzie równań niewiadomymi są wartości F_x i F_y siły (oryginalnie poszukiwane) oraz składowa momentu M w osi z : M_z (ponieważ sensor nie dostarcza tej informacji). Zapisując układ równań w postaci macierzowej mamy:

$$\begin{bmatrix} 0 & -z & 0 \\ z & 0 & 0 \\ -y & x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x - yF_z \\ M_y + xF_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

Rozwiązując ten układ równań otrzymamy wartość siły \vec{F} w układzie współrzędnych sensora momentu:

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_z \frac{y}{z} - M_x \frac{1}{z} \\ F_z \frac{x}{z} + M_y \frac{1}{z} \\ M_x \frac{x}{z} + M_y \frac{y}{z} \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

W przypadku wykorzystania modelu stałej krzywizny, dokładność estymacji położenia końcówki manipulatora będzie malała wraz ze zwiększającą się wartością działającej siły. Ma to bezpośredni wpływ na dokładność jej aproksymacji. Dokładniejsze wyniki można uzyskać przy wykorzystaniu magnetycznego sensora położenia absolutnego *Aurora*.

Rozdział 8

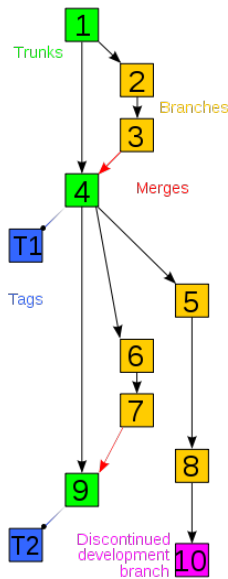
Oprogramowanie

8.1 System kontroli wersji

Konsorcjum odpowiedzialne za wykonanie projektu Stiff-Flop składa się z jedenastu jednostek badawczych z całego świata. Tego typu rozproszenie badaczy powoduje, że skuteczna kooperacja przy tworzeniu oprogramowania staje się wyzwaniem i stawia pewne wymagania co do sposobu organizacji wspólnej pracy. Zagadnienie to można rozpatrywać w dwóch płaszczyznach: metody uwspólniania i zabezpieczania wyników pracy oraz odpowiedniej architektury systemu.

Standardowym rozwiązaniem pierwszego z nich jest zastosowanie tzw. systemu kontroli wersji. Jest to system zarządzający zmianami w dokumentach, programach komputerowych lub innego typu informacjami zawartymi w plikach. Zmiany są zazwyczaj oznaczane pewnym numerem wersji – numerem zmiany lub np. unikalnym skrótem md5. System kontroli wersji pozwala na przywrócenie stanu dokumentu do dowolnej z jego wersji zapisanych w historii zmian. Zestaw plików podlegających wersjonowaniu wraz z zapisaną historią ich zmian nazywany jest *repozytorium*. Obecne rozwiązania pozwalają na operacje takie jak rozgałęzianie drzewa historii, oznaczanie kolejnych wersji lub łączenie poszczególnych gałęzi zmian. Przy jednoczesnej pracy kilku osób nad tym samym plikiem, jego historia może ulec rozgałęzieniu. Sprowadzenie repozytorium do spójnego stanu polega na połączeniu konfliktujących wersji. W obecnych systemach dzieje się to w głównej mierze automatycznie. Projekt Stiff-Flop wykorzystuje dwa systemy kontroli wersji – *Subversion*, przechowujący dokumenty związane z projektem oraz *bazaar*, służący do wersjonowania kodu źródłowego wszystkich programów.

Drugim zagadnieniem, kluczowym z punktu widzenia efektywności współpracy jest odpowiedni podział tworzonego systemu. Poprawny projekt architektury systemu powi-



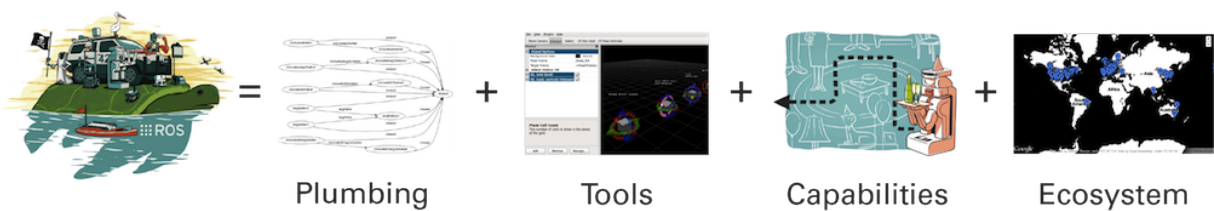
Rysunek 8.1: Przykładowa historia kolejnych zmian przechowywana w systemie kontroli wersji [37]

nien dzielić go na mniejsze, tematycznie spójne fragmenty oraz zapewniać, poprzez modularność, odpowiedni stopień wymienności elementów. Oprogramowanie powinno być na tyle elastyczne, aby można było je dostosowywać do potrzeb pojawiających się w trakcie trwania czteroletniego projektu. System przedstawiony w tej części pracy nie jest systemem docelowym, który ma być wykorzystywany w gotowym produkcie. Jego zadaniem jest jedynie zapewnienie wspólnej platformy dla algorytmów tworzonych przez różnych uczestników projektu. W projekcie badawczym takim jak Stiff-Flop występuje potrzeba częstego wprowadzania zmian z uwagi na ciągłą ponowną weryfikację pierwotnych założeń. Powoduje to, że od oprogramowania wymaga się możliwości zmiany implementacji poszczególnych podsystemów w prosty i szybki sposób. Taki stan rzeczy zapewnić może odpowiedni podział oprogramowania na podsystemy i zdefiniowanie ścisłych interfejsów komunikacji pomiędzy nimi.

8.2 System ROS

Z uwagi na sformułowane w poprzedniej sekcji wymagania oraz inne zalety w projekcie Stiff-Flop wykorzystano system ROS (Robot Operating System). Jest to platforma programistyczna, która wspiera tworzenie oprogramowania sterującego robotów. Zapewnia ona zestaw usług znacznie upraszczających programy – abstrakcję sprzętu, zestaw narzędzi do podstawowych czynności, standard komunikacji pomiędzy podsystemami oraz

zarządzanie nimi. Specyficzny schemat podejścia do problemu projektowania systemów przy wykorzystaniu ROS charakteryzuje się wysoką modularnością oraz wymiennością jego fragmentów. Oprogramowanie to zostało opracowane w celu wspierania współpracy pomiędzy jego użytkownikami przy tworzeniu software’u dla robotów [38]. Jedno z laboratoriów badawczych korzystających z ROS może zatrudniać ekspertów od tworzenia map wnętrz budynków, w związku z czym może udostępnić system światowej klasy do tworzenia tego typu map. Inna grupa może posiadać ekspertów od wykorzystywania map otoczenia do nawigacji robota, z kolei kolejna – posiadać system wizyjny który efektywnie rozpoznaje obiekty. System ROS zaprojektowany został specjalnie aby umożliwić współpracę takich grup, co pozwala na osiągnięcie znacznie lepszych efektów.



Rysunek 8.2: Schemat przedstawiający elementy składające się na system ROS. W jego skład wchodzi: *middleware* zapewniający komunikację, specjalistyczne narzędzia, możliwości robotów oraz społeczność, tworząca „ekosystem” ROS [39]

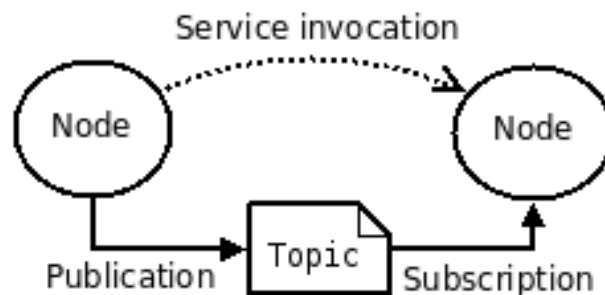
System ROS składa się z dwóch części. Pierwszą z nich jest podstawowe oprogramowanie pośredniczące (ang. *middleware*), rozwijane i utrzymywane przez organizację Open Source Robotics Foundation. Zawiera on funkcje umożliwiające na tworzenie sieci ROS i uruchamianie oraz budowanie węzłów sieci. Dodatkowo, w jego skład wchodzi również podstawowe narzędzia do monitorowania połączeń między węzłami, inspekcji wiadomości przesyłanych pomiędzy nimi, stanu sieci oraz wizualizacji. Budowa *middleware*’u pozwala na tworzenie sieci ROS składających się z wielu komputerów, przy czym następuje to w sposób całkowicie przezroczysty [40].

Drugą częścią ROS jest obszerna baza paczek z oprogramowaniem współtworzonych przez jego użytkowników. Każda z nich jest udokumentowana na głównej stronie projektu. Dzięki ujednoliconej metodzie budowy oprogramowania oraz systemowi pozwalającemu na określanie zależności pomiędzy paczkami, korzystanie z udostępnionego przez inne osoby oprogramowania jest proste. Istnienie tego typu społeczności złożonej z osób o różnej specjalizacji pozwala na szybką budowę oprogramowania dla robota, co z kolei umożliwia skupienie się na kluczowych dla danej osoby badaniach.

Koncepcje systemu ROS

W systemie ROS, przetwarzanie odbywa się w węzłach (ang. *node*). Węzły projektowane są z zachowaniem wysokiej modularności. Zadanie kontroli robota podzielone jest pomiędzy wieloma węzłami – oprogramowanie jednego robota składa się więc zazwyczaj z dużej ich liczby. Jeden węzeł może służyć, na przykład, do ustawiania kół robota pod zadany kąt, inny, z kolei będzie wysyłał komendy ustawień kół tak, aby utrzymać robota na ścieżce dostarczonej przez trzeci węzeł, zajmujący się planowaniem ścieżki. Węzły pisane są przy użyciu biblioteki klienckiej ROS.

Komunikacja pomiędzy węzłami odbywa się przy pomocy modelu publikuj-subskrybuj (pub-sub). Węzeł przesyła dane do innego węzła poprzez wymianę tzw. wiadomości (rys. 8.3). Wiadomość to struktura danych, składająca się z pól o ściśle zdefiniowanym typie. Wiadomości *publikowane* są w konkretnym *temacie*. Temat jest nazwą, która służy do identyfikacji zawartości wiadomości, które są pod nim wysyłane. Temat można traktować jako magistralę przesyłającą dane, do której podłączyć z dowolnej jej strony i wysyłać dane o określonym typie może dowolny uczestnik komunikacji.



Rysunek 8.3: Sposób komunikacji pomiędzy węzłami w systemie ROS [39]

Centralnym punktem sieci, w którym przechowywane są informacje o zarejestrowanych przez węzły tematach jest ROS *Master*. Każdy węzeł chcący rozpocząć nadawanie lub odbieranie wiadomości na dany temat w pierwszej kolejności zgłasza się do niego. ROS Master sprawdza, czy żądany temat został już opublikowany i, jeżeli tak nie jest, rejestruje go na liście tematów. Dodatkowo, zestawia on połączenia pomiędzy węzłami podłączonymi do tego samego tematu.

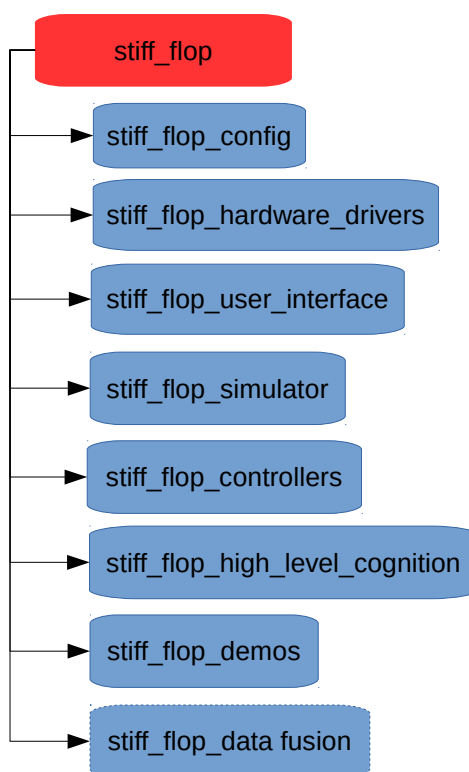
Węzły w sieci, wraz z połączeniami pomiędzy nimi tworzą graf przetwarzania. Dzięki narzędziom dostępnym w systemie ROS możliwy jest wgląd w aktualny stan sieci. Przykład grafu przetwarzania z czterema aktywnymi węzłami przedstawiony jest na rys. 8.4.



Rysunek 8.4: Przykładowy graf przetwarzania z czterema komunikującymi się ze sobą węzłami [41]

8.3 Architektura systemu Stiff-Flop

Rysunek 8.5 przedstawia podział oprogramowania systemu w tematyczne grupy. Podział ten znajduje odzwierciedlenie w strukturze katalogów, wewnątrz których przechowywane jest oprogramowanie.



Rysunek 8.5: Podział oprogramowania systemu Stiff-Flop na tematyczne grupy

Poszczególne elementy przedstawione na rysunku 8.5 odpowiadają tzw. *stosom* paczek w systemie ROS. Przeznaczeniem paczek jest przechowywanie pewnej liczby węzłów. Podział jest spójny tematycznie na każdym poziomie. Jeśli paczka reprezentuje pewną funkcjonalność systemu, jej węzły mogą być traktowane jako konkretne czynności potrzebne do jej wykonania. Stosy skupiają paczki o podobnym przeznaczeniu. Poniżej

zamieszczony został krótki opis przeznaczenia poszczególnych stosów.

stiff_flop_config

przechowuje paczki z różnego rodzaju plikami konfiguracyjnymi, zunifikowanym opisem manipulatora wykorzystywanym przez inne paczki, skryptami uruchamiającymi system itp.

stiff_flop_hardware_drivers

przechowuje sterowniki dla sprzętu wykorzystywanego w manipulatorze. Są to np. klasy obsługujące układy akwizycji danych.

stiff_flop_user_interface

znajdują się w nim paczki odpowiadające za prezentację stanu systemu dla użytkownika oraz interfejs umożliwiający na komunikację z nim.

stiff_flop_simulator

przechowuje paczki pozwalające na uruchomienie symulacji manipulatora. Znaczenie systemu symulacji przedstawione zostało w sekcji 8.3.3.

stiff_flop_controllers

znajduje się w nim oprogramowanie implementujące różne regulatory działające w systemie. Przykładem jest regulator poziomu ciśnienia wewnątrz komór aktywacyjnych.

stiff_flop_high_level_cognition

stos ten zawiera oprogramowanie sterujące zachowaniem manipulatora. Znajdują się w nim paczki odpowiedzialne m.in. za planowanie trasy manipulatora.

stiff_flop_demos

zawierają się w nim paczki z różnego rodzaju demonstratorami działania systemu.

stiff_flop_data_fusion

przechowuje paczki systemu fuzji danych, pozwalającego na estymację kształtu manipulatora na podstawie danych z dostępnych sensorów.

8.3.1 Główna pętla programu

Medyczne zastosowanie manipulatora stawia pewne wymagania dotyczące działania jego oprogramowania. Jednym z tych wymagań jest wysoka częstotliwość sterowania, dzięki czemu w trakcie niebezpiecznych sytuacji jest pewność, że system będzie gotowy

do działania i pozwoli na adekwatną reakcję. Główną petlę programu zaimplementowano wówczas w taki sposób, aby była wykonywana z częstotliwością 1 kHz. Osiągnięcie częstotliwości tego rzędu wymaga od systemu operacyjnego specjalnego traktowania procesu. Podczas działania programu, dostępnym dla niego czasem procesora zarządza systemowy planer (ang. *scheduler*). W związku z jego działaniem proces może nie mieć możliwości wykonania swojego kodu w żądanym czasie, co powoduje, że nie jest to system czasu rzeczywistego. Innym czynnikiem mającym wpływ na dokładność okresowego wykonania kodu pewnego programu jest ładowanie procesu w pamięci podręcznej (ang. *cache*). Dostęp procesora do pamięci RAM (Random Access Memory) jest relatywnie wolny. W celu jego przyspieszenia wykorzystuje się kilka poziomów pamięci podręcznej. Fragmenty pamięci RAM ładowane są do pamięci podręcznej, dzięki czemu dostęp do nich jest szybszy. W przypadku gdy procesor chce uzyskać dostęp do fragmentu pamięci, który nie jest akurat załadowany w cache mamy do czynienia z tzw. *cache miss*. W takiej sytuacji procesor sięga po potrzebne dane do wolniejszej pamięci RAM, a jeśli nie znajdują się one tam – do pamięci swap.

Zapewnienie wykonania pętli w czasie rzeczywistym możliwe jest przy pomocy kilku zabiegów przeciwdziałających powyższemu efektom. Po pierwsze, istnieje możliwość zwiększenia priorytetu danego procesu w planerze. Inną czynnością zwiększającą terminowość wykonania kodu jest zablokowanie pamięci programu w pamięci podręcznej. Pozwoli to na uniknięcie efektu cache miss. Możliwe jest też zastosowanie specjalnej wersji jądra systemu operacyjnego, zapewniającego *ostre ograniczenia czasowe* (ang. *hard real-time*). Tego typu rozwiązanie nie zostało zastosowane w projekcie Stiff-Flop z uwagi na obniżoną stabilność pracy systemów wykorzystujących jądra hard real-time.

Dalsze usprawnienia są możliwe poprzez np. oddelegowanie osobnego rdzenia procesora do wykonywania jedynie wątku danego procesu, ustawienie wszystkich przerw procesora oprócz przerw od karty sieciowej tak, aby nie były obsługiwane na tym rdzeniu.

W ciągu każdej milisekundy na komputerze:

1. Wykonywane są kolejne kroki regulatorów PID dla każdego aktuatora
2. Wysyłany jest pakiet przez port Ethernet zawierający wszystkie komendy dla aktuatorów i inne dane wyjściowe
3. Odbierany jest pakiet zawierający dane z wszystkich sensorów podłączonych w systemie
4. Część danych z sensorów jest publikowana w systemie ROS

8.3.2 Akwizycja danych

Akwizycja danych w systemie wykonywana jest przy pomocy systemu *RoNeX*. Wytworzony on został przez firmę Shadow Robot Company w ramach projektu Stiff-Flop. W chwili obecnej jest on sprzedawany jako komercyjny produkt. RoNeX pełni rolę szybkiej (100Mbps) szyny komunikacyjnej, która jest interfejsem pomiędzy sprzętem (aktuatorami i sensorami) a sterującym nim oprogramowaniem komputerowym. System ten został zaprojektowany specjalnie z myślą o robotach wykorzystujących ROS i ma on ułatwić badaczom nieposiadającym zaplecza inżynierskiego połączenie oprogramowania z wykorzystywanym przez nich sprzętem. Jego obsługa polega na podłączeniu modułów wejścia/wyjścia (rys. 8.6b) z mostkiem sieciowym (rys. 8.6a) poprzez kabel ethernet (skrętka). System zasilany jest przy pomocy technologii PoE (Power over Ethernet).



(a) Mostek



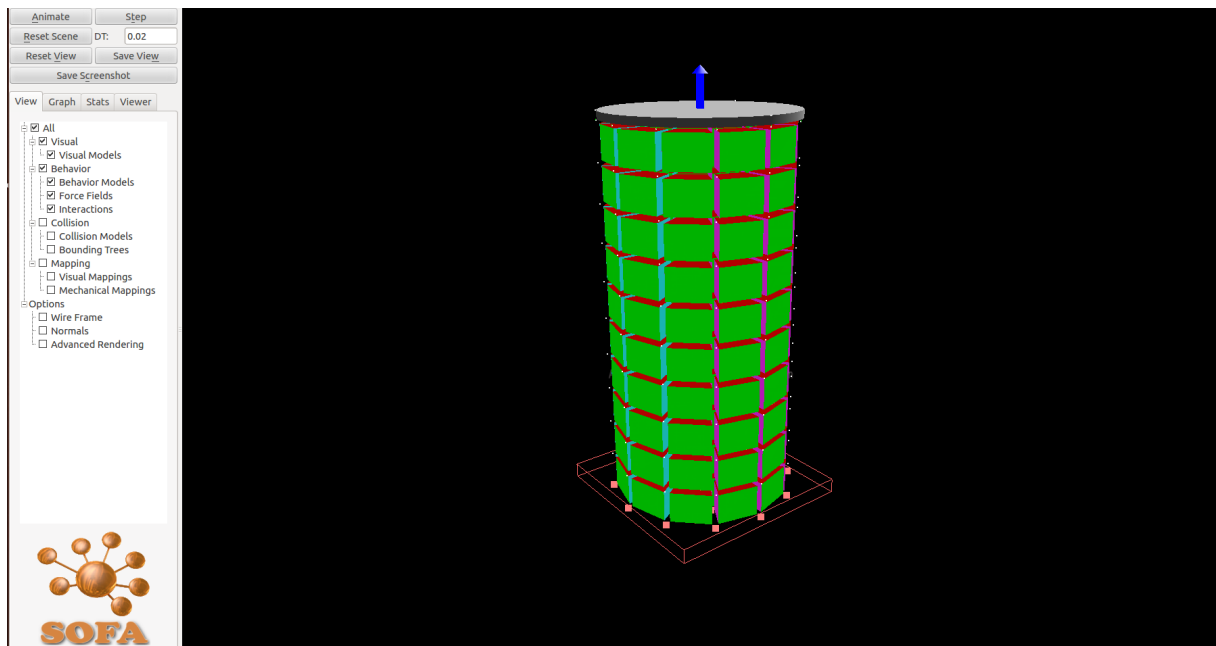
(b) Moduł GIO

Rysunek 8.6: Elementy systemu RoNeX [42]

Programistycznie, system RoNeX obsługuje się poprzez pisanie sterowników obsługujących dane z każdego podłączonego modułu GIO. Sterowniki te są automatycznie ładowane w momencie wykrycia przez system odpowiedniego modułu. Sterownik może np. przetwarzać dane z podłączonych do modułu czujników przy użyciu macierzy kalibracji lub wydawać odpowiednie komendy podłączonym do modułu aktuatorom. Głównym punktem przekazywania informacji tj. dane z sensorów czy komendy jest struktura przechowywana w pamięci dzielonej przez wątki/procesy systemu Stiff-Flop.

8.3.3 Symulator

Ważnym elementem systemu z punktu widzenia procesu rozwijania projektu jest symulator. W projekcie o niskim stopniu wykonalności, takim jak Stiff-Flop, większość części projektu nie jest z początku gotowa. Z tego powodu dokładny symulator jest

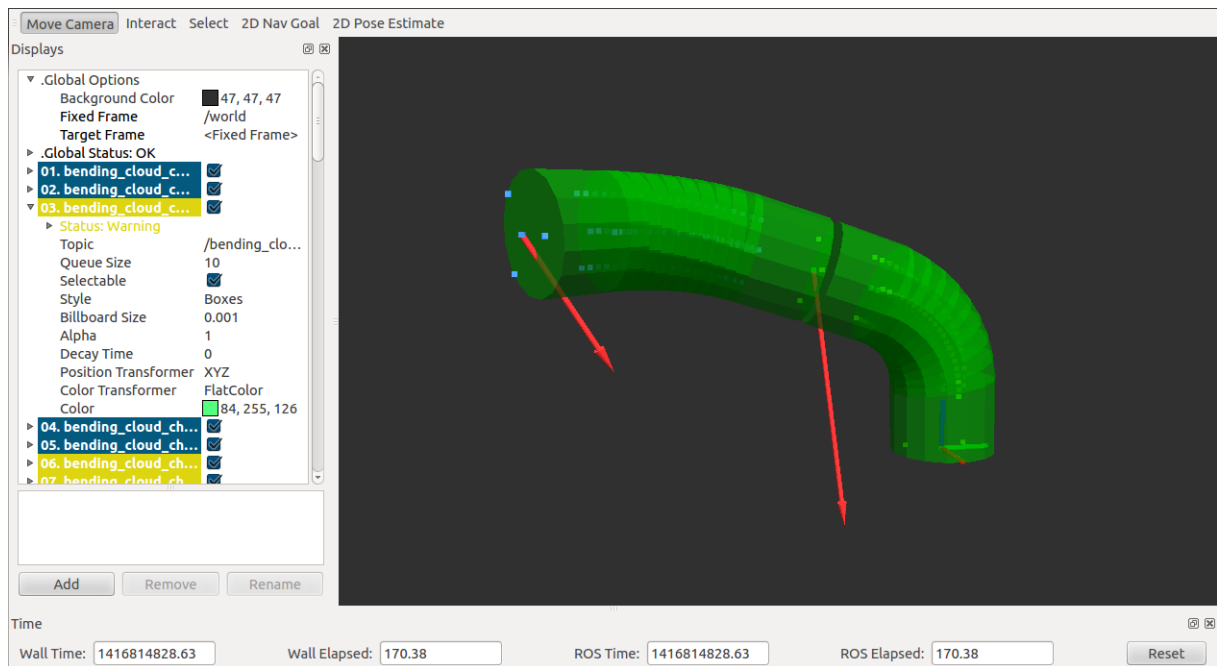


Rysunek 8.7: Zrzut ekranu z symulacji manipulatora w programie Sofa

kluczowy dla pracy konsorcjantów, których praca zależy od wyników innych zadań. W oprogramowaniu projektu Stiff-Flop, symulacja realizowana jest przez program *Sofa*. Jest to oprogramowanie o otwartych źródłach, które umożliwia tworzenie symulacji, w szczególności z dziedziny medycyny. Został on zinterfejsowany z systemem Stiff-Flop poprzez połączenie UDP. Manipulator został w nim zamodelowany przez zestaw elementów tworzących kształt walca. Pneumatyczna aktywacja osiągnięta jest poprzez przykładanie do każdego z dysków pary sił działających na niego. Zrzut ekranu symulacji w programie *Sofa* przedstawiony jest na rys. 8.7.

8.3.4 Wizualizacja stanu robota

Głównym środkiem do wizualizacji stanu robota jest standardowe narzędzie systemu ROS – RViz. Pozwala ono na wizualizację większości typów wiadomości dostępnych w ROS, oraz udostępnia mechanizmy do rysowania prostych trójwymiarowych obiektów geometrycznych lub stworzonych w programach do modelowania 3D siatek trójkątów w określonej przez program pozycji. Zadanie umiejscawiania elementów robota na podstawie informacji o jego stanie zajmuje się osobny węzeł o nazwie: *robot_state_publisher*. Zrzut ekranu wizualizacji w programie RViz przedstawiony jest na rys. 8.8.



Rysunek 8.8: Zrzut ekranu z programu RViz wykorzystywanego do wizualizacji stanu robota

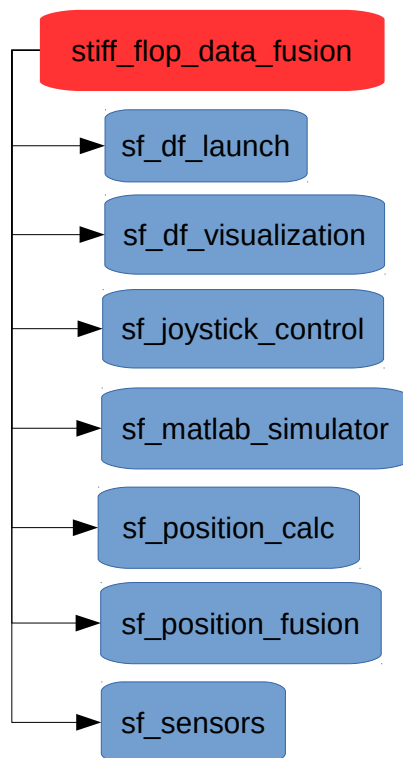
8.4 Architektura systemu fuzji danych

System fuzji danych jest jedynym źródłem informacji o przewidywanej aktualnej konfiguracji manipulatora. Na tych danych opierają się systemy wnioskowania wysokiego poziomu jak i kontrolery poziomu ciśnienia w komorach aktywacyjnych. Wymaganie sterowania z częstotliwością 1kHz implikuje konieczność implementacji systemu fuzji danych wewnątrz ogólnego systemu Stiff-Flop. Na chwilę obecną, nie została jeszcze opracowana ostateczna wersja fuzji danych, w związku z czym autorzy pracy wciąż korzystają z narzędzi umożliwiających szybkie prototypowanie kosztem pomniejszonej efektywności. System fuzji danych uruchamiany jest osobno, w postaci zestawu węzłów systemu ROS. Komunikują się one z macierzystym systemem Stiff-Flop poprzez mechanizm wiadomości, w przeciwieństwie do pamięci dzielonej w docelowym systemie.

Językiem wybranym do implementacji fuzji danych jest *Python*. Jest to język interpretowany, który jest wspierany przez system ROS. Brak konieczności rekompilacji kodu po wprowadzeniu każdej zmiany znacznie przyspiesza proces projektowania algorytmów. Dodatkowo, Python posiada obszerną bibliotekę standardową, w której zaimplementowane jest wiele podstawowych funkcjonalności, takich jak operacje na macierzach czy układach odniesienia.

Architektura systemu fuzji danych zaprojektowana została z myślą o zachowaniu

dużej modularności, która jest inherentną cechą ROS. Oprogramowanie podzielone zostało tematycznie w przedstawiony na rys. 8.9 sposób.



Rysunek 8.9: Podział oprogramowania systemu fuzji danych na tematyczne grupy

Poniżej przedstawiony został krótki opis każdej z paczek:

sf_df_launch

paczka zawierająca konfigurację takie jak parametry robota oraz skrypty uruchamiające system fuzji danych.

sf_df_visualization

paczka zawiera węzły służące do wizualizacji danych pochodzących z systemu fuzji danych. Publikuje ona trójwymiarowe obiekty geometryczne do programu RViz.

sf_joystick_control

przechowuje węzły służące do bezpośredniej kontroli manipulatorem w otwartej pętli przy pomocy dżojstika. Programy do kontroli zostaną przybliżone w sekcji 8.6.

sf_matlab_simulator

zawiera symulację manipulatora w programie Matlab bazującą na modelu fizycz-

nym opracowanym przez autorów pracy. Symulacja ta nie jest na chwilę obecną wykorzystywana.

sf_position_calc

paczka zawierająca różne metody odtwarzania pozycji na podstawie danych pośrednich. Przechowuje węzły obliczające chmurę punktów reprezentującą pozycję manipulatora przy pomocy modelu stałej krzywizny oraz fizycznego.

sf_position_fusion

paczka przechowująca węzły służące do fuzji danych pochodzących z modeli.

sf_sensors

paczka pomocnicza, której węzły służą do obsługi i kalibracji sensorów siły oraz długości. Kalibracja sensorów długości dokładniej opisana jest w rozdziale 8.5.

Parametry manipulatora takie jak długość sztywnego połączenia pomiędzy modułami, średnica modułu czy ich liczba ulegają częstej zmianie a wykorzystywane są przez większość programów systemu fuzji danych. Aby uniknąć wielokrotnej zmiany parametrów w każdym programie osobno, parametry te opisane są przez wspólny plik konfiguracyjny. Pozwala to na szybkie dostosowanie całego systemu fuzji danych do posiadanej wersji manipulatora. Programy startowane są z wczytanymi parametrami z tego pliku. Zaimplementowana została również funkcja dynamicznego dostrajania części z parametrów modeli w trakcie działania systemu.

8.5 Oprogramowanie sensora długości

Sensor długości jest sensorem, który może być wykorzystany bezpośrednio do estymacji konfiguracji manipulatora. Podstawowa idea przedstawiona została w rozdziale 2.2.1. W celu wykorzystania tego sensora, autorzy pracy musieli w pierwszej kolejności opracować metodę jego kalibracji oraz opracować odpowiednie do tego oprogramowanie.

W optycznym sensorze długości, mierzonym zjawiskiem fizycznym jest intensywność światła, które przebyło pewną drogę. Do jej pomiaru wykorzystane zostały cyfrowe czujniki światłowodowe FS-N11-MN firmy Keyence (rys. 8.10).

Istotą kalibracji jest wyznaczenie zależności pomiędzy długością komory a zmierzoną intensywnością. Z uwagi na charakter wykorzystywanego zjawiska fizycznego, zależność ta jest silnie nieliniowa. Z tego powodu, każde włókno światłowodu mierzące długość jednej komory jest kalibrowane osobno. Intensywność światła docierającego do



Rysunek 8.10: Cyfrowy czujnik światłowodowy Keyence FS-N11-MN [43]

detektora jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu przebytej odległości w powietrzu. Pożądaną zależnością jest zależność do niej odwrotna. Procedura kalibracji dopasowuje funkcję odwrotną do zebranego zestawu danych i zapisuje do pliku jej parametry. Funkcja ta przekształca surowe dane z sensora Keyence bezpośrednio na długość danej komory. Dane do kalibracji zbierane są w całym zakresie pracy sensora (pełnym zakresie dopuszczalnych zgięć jednego modułu) z rozdzielczością 1mm. Metodą dopasowania funkcji jest metoda Levenberg-Marquardt. W celu łatwiejszej weryfikacji poprawności wyznaczonego dopasowania, wynikowa funkcja rysowana jest na wykresie wspólnie z zebranymi punktami kalibracyjnymi.

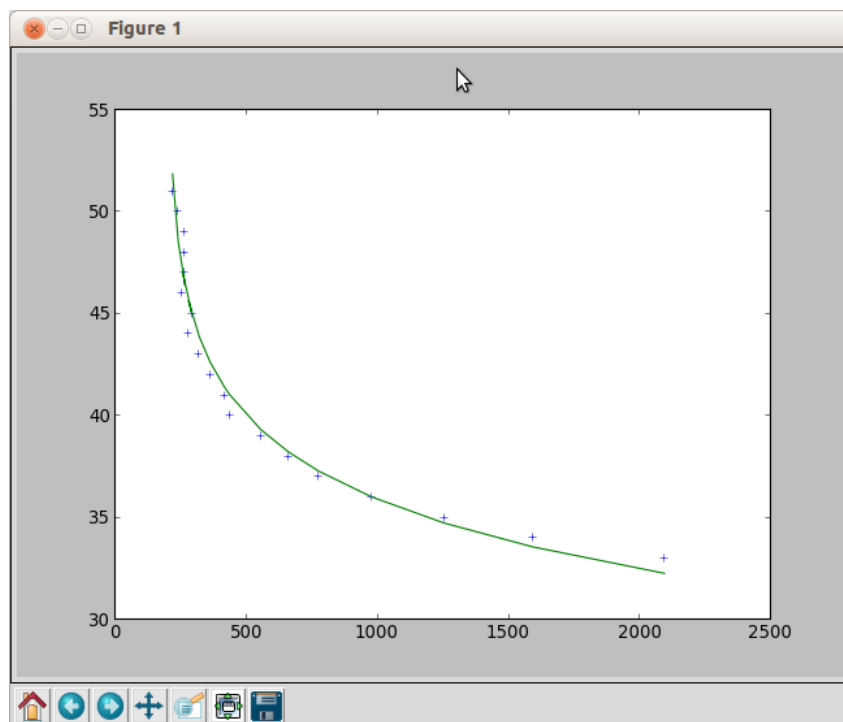
Opisana wyżej kalibracja dostarcza jedynie długości poszczególnych komór. Wykorzystywane są one w procesie fuzji danych do weryfikacji wyników modeli oraz do estymacji konfiguracji manipulatora.

8.6 Sterowanie bezpośrednio robotem

Do celów testowych opracowany został algorytm oraz oprogramowania umożliwiające bezpośrednią kontrolę każdego segmentu manipulatora przy użyciu standardowego kontrolera do gier posiadającego gałki *Analog*. Kontroler wykorzystywany w ramach pracy to Sony DualShock 3 (rys. 8.12).

Sterowanie zostało tak opracowane, aby wychylenie gałki od pozycji spoczynkowej określało kąt zgięcia manipulatora, a kąt, pod którym wychylona została gałka - kierunek zgięcia. Aby to osiągnąć, należało znaleźć matematyczną zależność wyznaczającą ciśnienia na podstawie konfiguracji gałki.

Wartościami, którymi chcemy sterować są kąt zgięcia manipulatora oraz jego kierunek. Pożądana zależność pomiędzy wychyleniem gałki dżojstika a odpowiadającą jej konfiguracją manipulatora przedstawiona została na rys. 8.13. Na lewej części tego ry-



Rysunek 8.11: Program dopasowujący funkcję do pomiarów kalibracyjnych

sunku przedstawiona została schematycznie wychylona gałka dżojstika (joy). Przy pomocy odczytów z osi poziomej i pionowej znana jest informacja o jej wychyleniu - x oraz y na rysunku. Chcemy, aby moduł zginał się w tym samym kierunku co gałka, w związku z czym wektor momentu gnącego M , który ma działać na manipulator musi mieć kierunek prostopadły do rzutu wychylonej gałki na płaszczyznę XZ . Z prawej strony rysunku widoczny jest schemat manipulatora, na którego działa pożądaný moment gnący oraz słupkowe przedstawienie wyznaczonych na jego podstawie ciśnień w poszczególnych komorach aktywacyjnych robota. Poniżej, opisany został sposób otrzymywania wartości ciśnień P_1, P_2, P_3 w komorach aktywacyjnych skutkującym powstaniem żądanego momentu gnącego M .

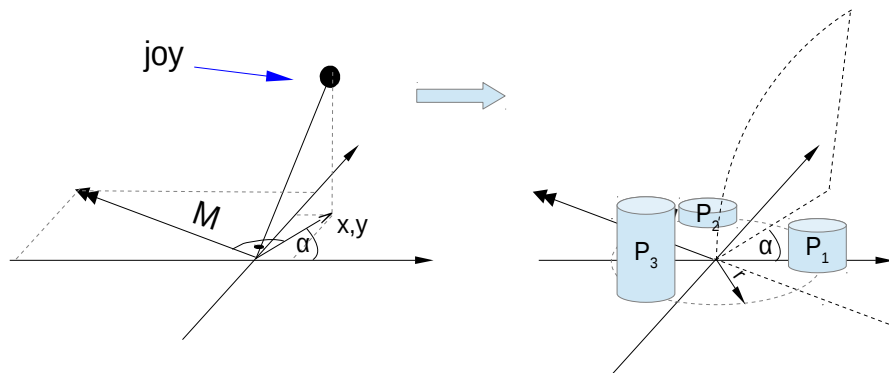
Zakłada się, że krzywizna modułu jest wzrasta proporcjonalnie do momentu go gnącego, który jest skutkiem ciśnień panujących w komorach aktywacyjnych. Dzięki temu możemy określić kierunek α wektora momentu gnącego M oraz jego długość $|M|$ na podstawie informacji o stopniu wychylenia gałki dżojstika w osiach x oraz y :

$$\begin{aligned} |M| &= \text{sqrt}(x^2 + y^2) \\ \alpha &= \text{atan2}(y, x) + \frac{\pi}{2} \end{aligned} \tag{8.1}$$

Zmiana współrzędnych na biegunowe pozwala na łatwe ograniczenie przestrzeni do koła. Taka zmiana jest pożądana, ponieważ maksymalne zgięcie modułu powinno



Rysunek 8.12: Kontroler Sony DualShock 3 wykorzystywany do sterowania manipulatorem



Rysunek 8.13: Zależność pomiędzy wychyleniem gałki dżojstika (z lewej) a pożądaną konfiguracją manipulatora (z prawej)

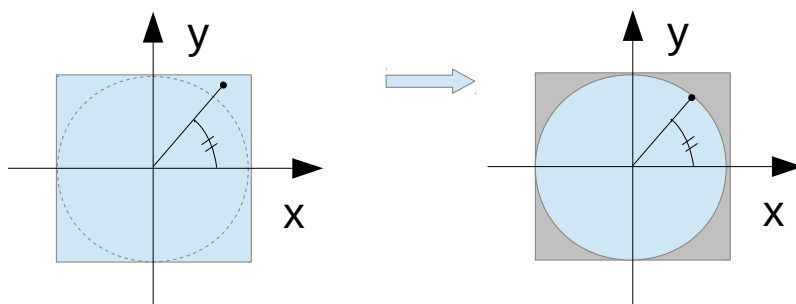
być takie samo dla każdego kierunku. Oryginalnie, przestrzeń ta ma kształt kwadratu (rys. 8.14).

Aktywacja komory powoduje powstawanie sił w jej przekrojach poprzecznych. Siły te tworzą moment gnący względem osi danego przekroju. Sytuację przedstawia rys. 8.15. Ciśnienie panujące w komorze zostało na nim oznaczone przez P , siła wywołana ciśnieniem - F , a pole przekroju poprzecznego komory - a .

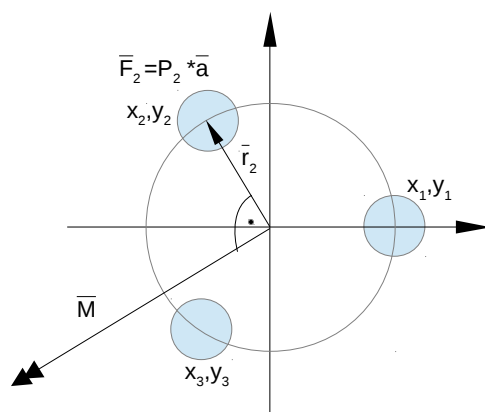
Moment gnący w danym przekroju może być opisany wyrażeniem (8.2).

$$\vec{M} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \vec{r}_1 \times \vec{F}_1 + \vec{r}_2 \times \vec{F}_2 + \vec{r}_3 \times \vec{F}_3 \quad (8.2)$$

gdzie M_x , M_y , M_z oznaczają składowe x , y i z momentu gnącego, a \vec{r}_n oraz \vec{F}_n promień działania oraz siłę generowaną w n -tej komorze.



Rysunek 8.14: Ograniczenie maksymalnego modulu zadawanego momentu gnącego



Rysunek 8.15: Powstawanie momentu gnącego w danym przekroju poprzecznym spowodowane aktywacją komory

Wykorzystując fakt, że siły mają w tym układzie wartości tylko wzdłuż osi Z, możemy przepisać równanie (8.2) do następującej postaci (8.3).

$$\vec{M} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ \sum_{i=1}^3 F_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 \\ -x_1 & -x_2 & -x_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = A \times \vec{F} \quad (8.3)$$

Tak więc wartość siły działającej na każdą z komór opisana jest równaniem: $\vec{F} = A^{-1} \times \vec{M}$, gdzie żądany moment gnący jest określony przez pozycję gałki dźwojstika:

$$\vec{M} = \begin{bmatrix} |M|\cos(\alpha) \\ |M|\sin(\alpha) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

Wartości sił \vec{F} mogą być przekształcone do żądanych ciśnień w poszczególnych komorach poprzez podzielenie przez pole przekroju poprzecznego komory a .

Równanie (8.4) zakłada, że suma ciśnień w komorach wynosi zero. Momenty gnące powodowane są jedynie poprzez różnice ciśnień w komorach. Istnieje w związku z tym pewna składowa stała, która w praktyce określa wydłużenie modułu. Można na nią wpływać poprzez zmianę ostatniego pola w macierzy z równania (8.4). Przy pewnych jego wartościach, wyznaczone ciśnienia mogą być ujemne. W tym przypadku dodawana jest pewna wartość do każdego z nich - może to być na przykład najmniejsza wartość z wyliczonych ciśnień. Końcową wartość wyznaczonych ciśnień określa równanie (8.5).

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{a} \left(\vec{F} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \min(F) \right) \quad (8.5)$$

Poniżej zamieszczony został fragment kodu w języku Python, który oblicza ciśnienia na podstawie wychylenia gałki dżojstika.

```
A = matrix([[0, pow(3,0.5)*r/2, -pow(3,0.5)*r/2],[-r, r/2, r/2],[1, 1, 1]])
x, y = joy.axes[0], joy.axes[1]

Mvalue = sqrt(x*x+y*y)

if Mvalue > 1:
    Mvalue = 1

Mdir = atan2(y,x)

x = Mvalue*cos(Mdir)
y = Mvalue*sin(Mdir)

pressures = A.I * matrix([[x], [y], [0]]);
pressures = pressures - matrix([[1], [1], [1]])*(min(pressures))
```

Rozdział 9

Testy

W celu zbadania dokładności zaprojektowanego w ramach pracy modelu fizycznego (rozdział 3.2) przeprowadzono szereg testów. Weryfikacja przeprowadzono z wykorzystaniem dwusegmentowego robota złożonego z modułów wyposażonych w opracowane przez autorów zbrojenie komór ciśnieniowych (opisane w rozdziale 5.1.4).

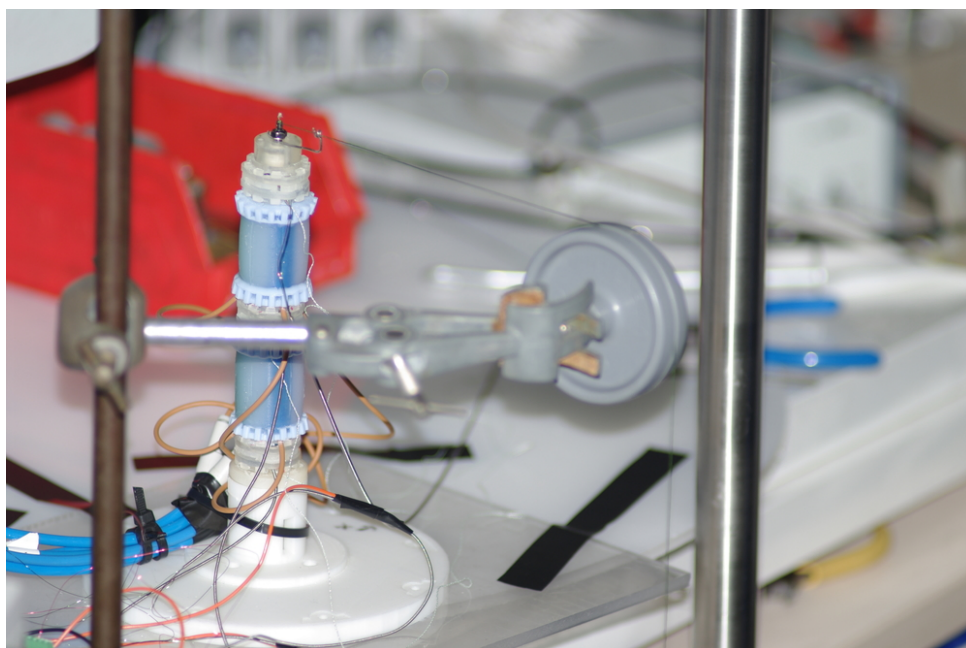
9.1 Metodyka badań

Badanie zostało przeprowadzone w następujący sposób: manipulator został ustawiony w pewnej pozycji przy pomocy ciśnień, po czym porównywany był odczyt bezwzględnego sensora pozycji (system *Aurora*) z pozycją obliczoną przez model. Następnie zbadano zachowanie modelu przy występowaniu sił zewnętrznych. W tym celu powtórzono czynności z poprzedniego testu, przykładając w każdej pozycji manipulatora kilka różnych co do wartości sił prostopadłych do osi manipulatora, działających na jego końcówkę.

9.2 Stanowisko pomiarowe

W celu wykonania testów zaprojektowane, oprogramowane i wykonane zostało odpowiednie stanowisko pomiarowe. Składa się ono z systemu aktywacji manipulatora, samego manipulatora, systemu zadawania sił zewnętrznych oraz bezwzględnego sensora pozycji. Zawory sterujące, zasilane z kompresora, regulują wartość ciśnienia w komorach aktywacyjnych robota. Zawory sterowane są przy użyciu systemu RoNeX oraz oprogramowania komputera. Markery sensora położenia bezwzględnego *Aurora* zamontowano w bazie manipulatora i na końcówce każdego z jego modułów. Siła zadawana jest po-

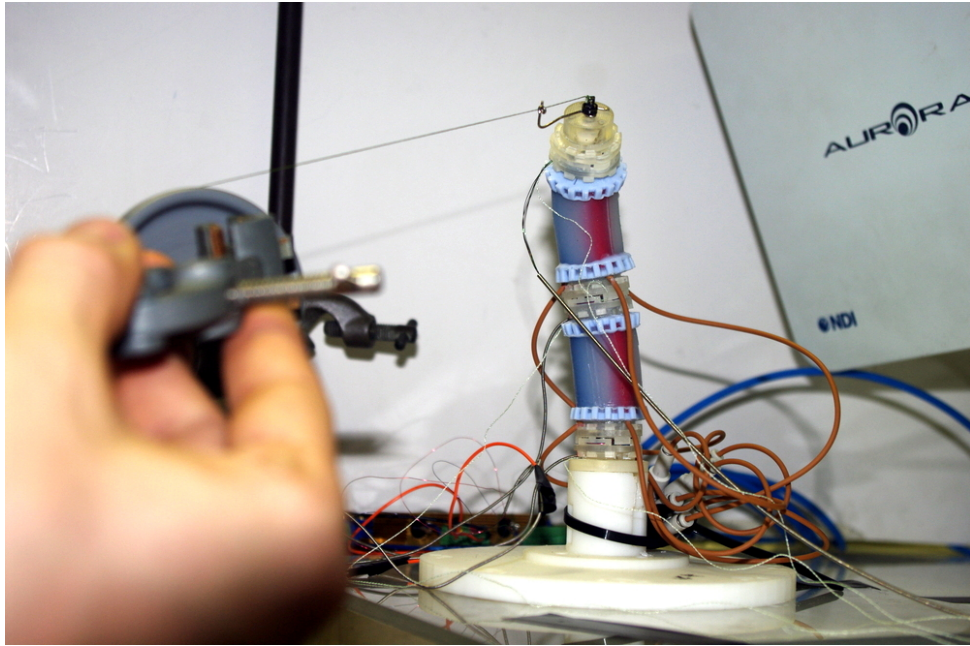
przez zawieszanie obciążników o znanej masie na lince poprowadzonej przez bloczek i przymocowanej do końcówki manipulatora. Zdjęcie stanowiska przedstawiono na rysunkach 9.1 oraz 9.2.



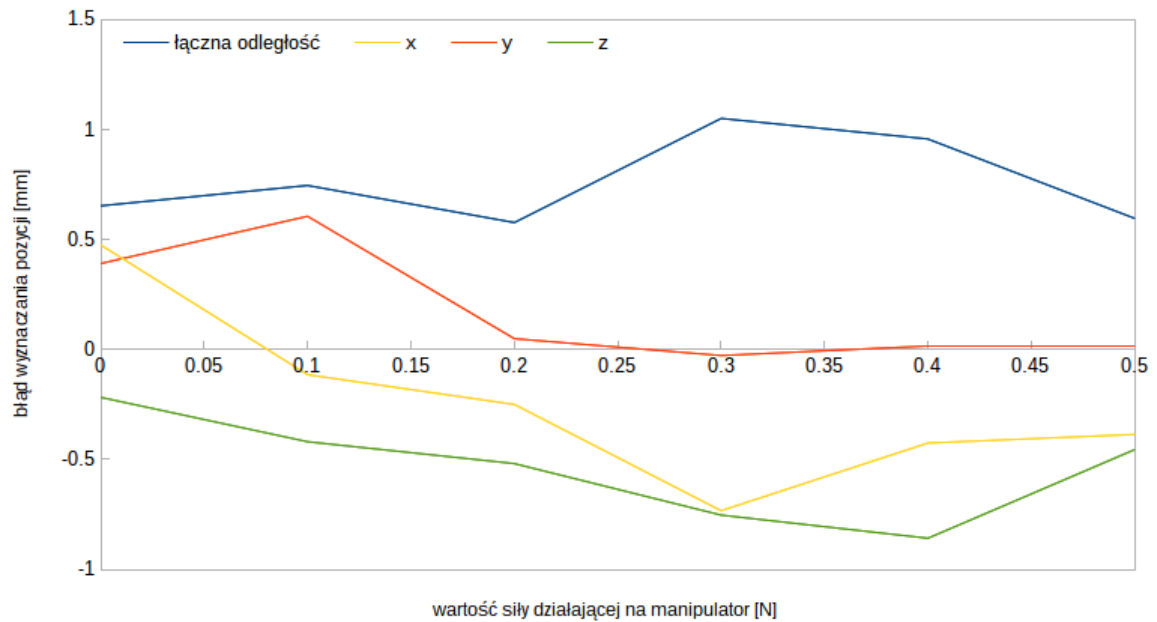
Rysunek 9.1: Stanowisko pomiarowe do weryfikacji poprawności modelu fizycznego – ujęcie pierwsze

9.3 Wyniki

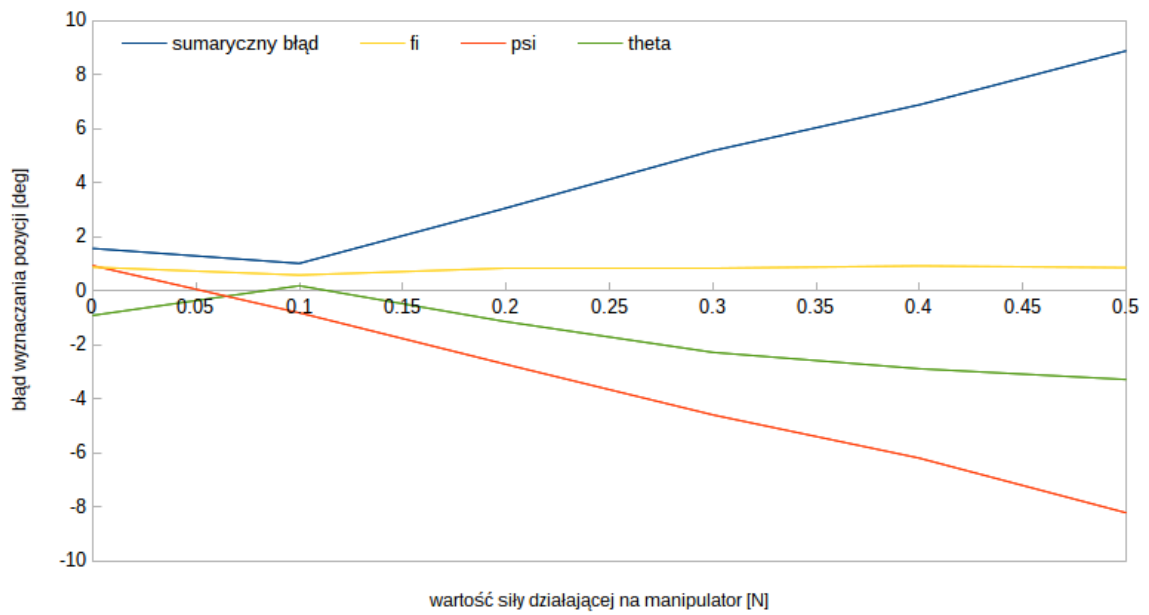
Błędy estymacji konfiguracji manipulatora badano w trzech konfiguracjach - zginanego siłą zewnętrzną prostego manipulatora, manipulatora zgiętego przy pomocy ciśnień a "doginanego" przez zewnętrzną siłę oraz sytuacji, w której zachodzi skręcanie manipulatora. Błędy wyznaczonej przez model pozycji oraz orientacji końcówki w funkcji wartości działającej na manipulator siły przedstawiono na rysunkach 9.3-9.8. Można zaobserwować, że w badanym zakresie działających sił i konfiguracji pierwotnych manipulatora błąd wyznaczonej przez model pozycji był rzędu kilku milimetrów. Błędy te wynikają prawdopodobnie z niedoskonałej metody pomiaru siły oraz dopasowaniu parametrów modelu do manipulatora. Z powodu dużych szumów w trakcie pomiaru nie jest możliwe odczytanie zależności błędu wyznaczonej pozycji i orientacji końcówki manipulatora od wartości działającej na niego zewnętrznej siły.



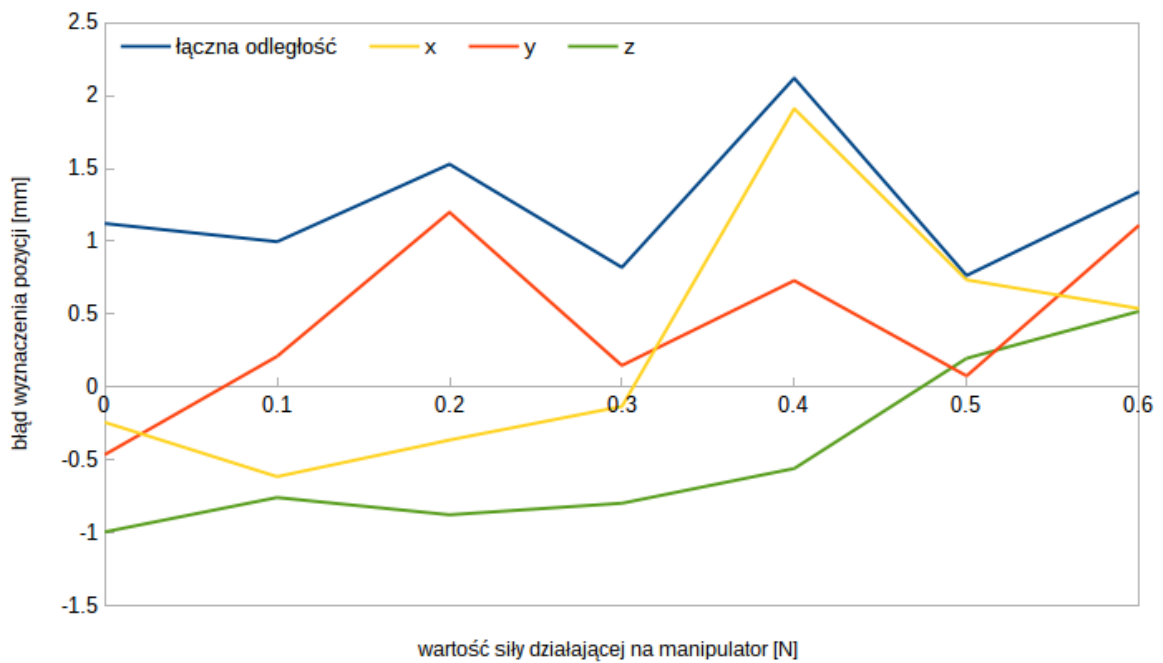
Rysunek 9.2: Stanowisko pomiarowe do weryfikacji poprawności modelu fizycznego – ujęcie drugie



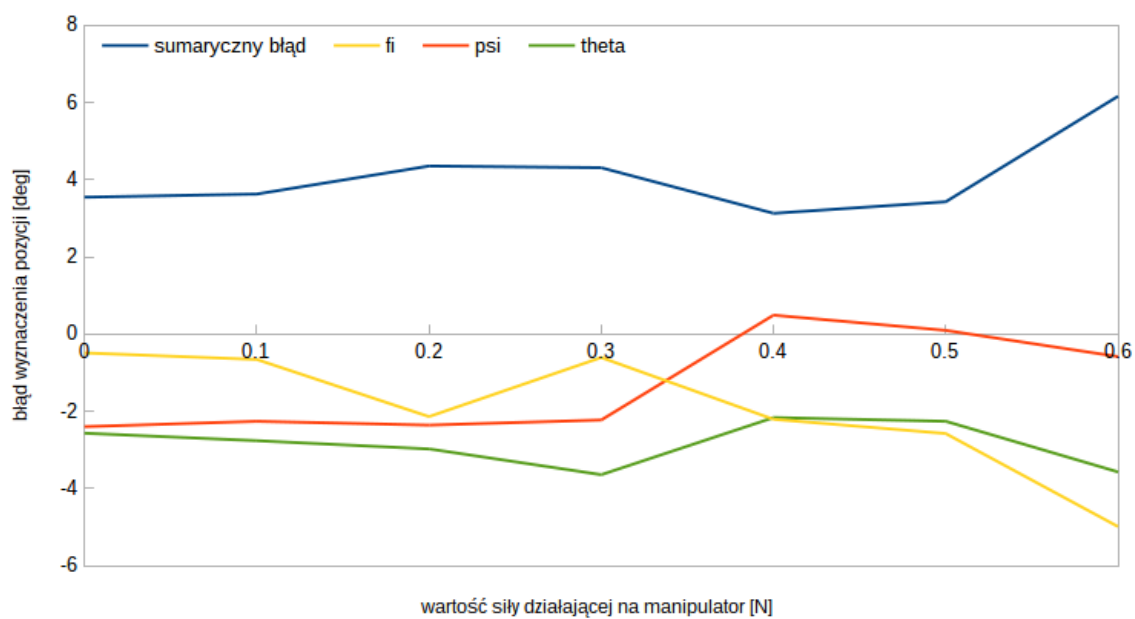
Rysunek 9.3: Błąd wyznaczonej przez model pozycji końcówki zginanego przez zewnętrzną siłę, prostego manipulatora



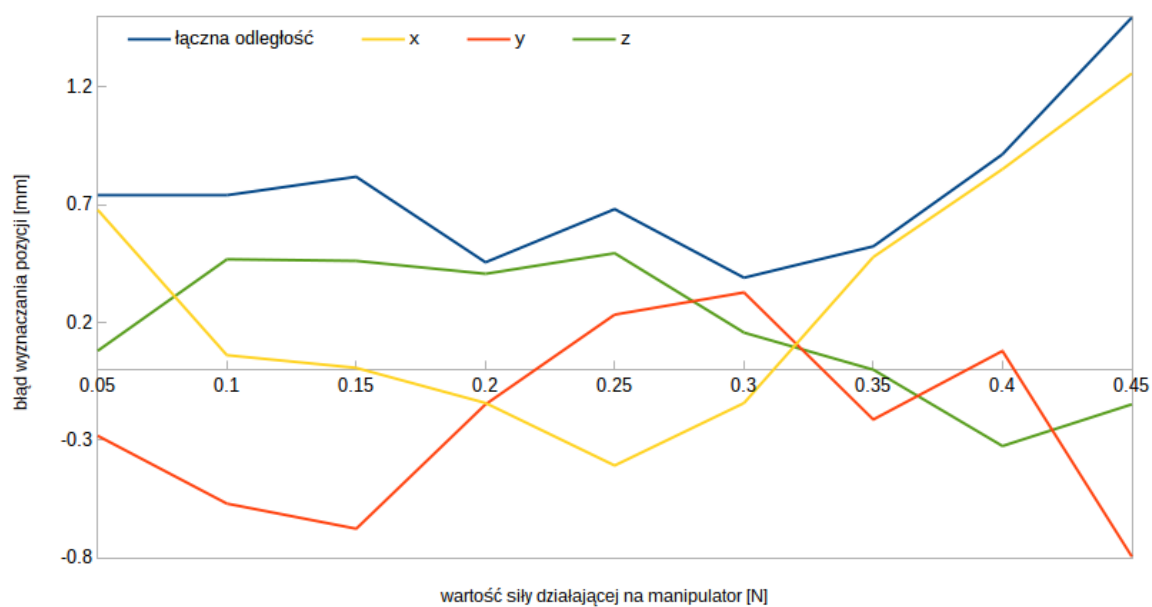
Rysunek 9.4: Błąd wyznaczonej przez model orientacji końcówki zginanego przez zewnętrzną siłę, prostego manipulatora



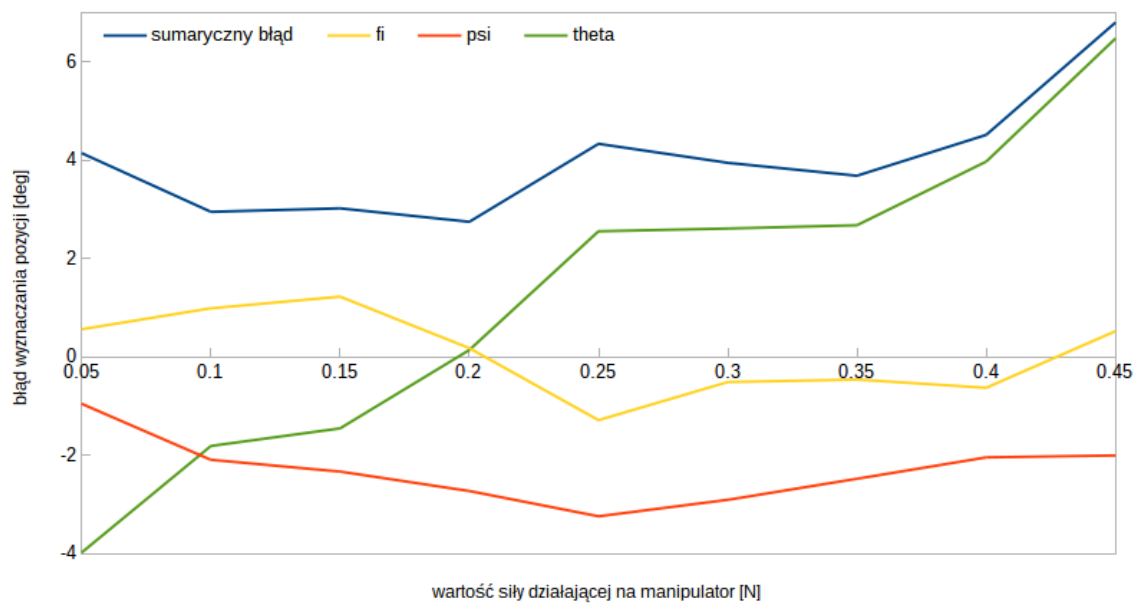
Rysunek 9.5: Błąd wyznaczonej przez model pozycji końcówki manipulatora doginanego przez zewnętrzną siłę



Rysunek 9.6: Błąd wyznaczonej przez model orientacji końcówki manipulatora doginanego przez zewnętrzną siłę



Rysunek 9.7: Błąd wyznaczonej przez model pozycji końcówki manipulatora, który ulegał skręceniu pod wpływem działania zewnętrznej siły



Rysunek 9.8: Błąd wyznaczonej przez model orientacji końcówki manipulatora, który ulegał skręceniu pod wpływem działania zewnętrznej siły

Rozdział 10

Podsumowanie

W niniejszej pracy zostały opisane prace związane z projektem Stiff-Flop wykonane w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Celem projektu jest opracowanie technologii pozwalającej na wprowadzenie robotów miękkich do obszarów medycznych, do zastosowań takich jak badania wziernikowe oraz chirurgia małoinwazyjna. Robotyka medyczna jest wciąż młodą i dynamicznie rozwijającą się dziedziną nauki i wymaga opracowania całej gamy nowych metod sterowania, postrzegania oraz aktywacji robotów. W kolejnych rozdziałach staraliśmy się przedstawić zagadnienia z którymi zmagaliśmy się podczas pracy w projekcie. Część problemów została rozwiązana, niektóre udało się tylko zdiagnozować i w dalszym ciągu pozostają nierozwiązane. W chwili składania pracy główne wysiłki autorów skupione są na dalszej minimalizacji modułów manipulatora oraz na opracowaniu automatycznych metod kalibracji czujników oraz doboru parametrów modelu fizycznego. W pozostałej części projektu planowane jest uruchomienie w pełni oczujnikowanego robota zdolnego do małoinwazyjnej manipulacji w ograniczonej przestrzeni kontrolowanego za pomocą w pełni kompletnej konsoli operatora.

Bibliografia

- [1] Juliane Bingener, Melanie L Richards, Wayne H Schwesinger, William E Strodel, and Kenneth R Sirinek. Laparoscopic cholecystectomy for elderly patients: gold standard for golden years? *Archives of Surgery*, 138(5):531–536, 2003.
- [2] C Daniel Smith, Collin J Weber, and J Richard Amerson. Laparoscopic adrenalectomy: new gold standard. *World journal of surgery*, 23(4):389–396, 1999.
- [3] Frederick J Rescorla, Scott A Engum, Karen W West, Scherer LR Tres 3rd, Thomas M Rouse, and Jay L Grosfeld. Laparoscopic splenectomy has become the gold standard in children. *The American surgeon*, 68(3):297–301, 2002.
- [4] Antonio M Lacy, Juan C García-Valdecasas, Salvadora Delgado, Antoni Castells, Pilar Taurá, Josep M Piqué, and Josep Visa. Laparoscopy-assisted colectomy versus open colectomy for treatment of non-metastatic colon cancer: a randomised trial. *The Lancet*, 359(9325):2224–2229, 2002.
- [5] Pierre J Guillou, Philip Quirke, Helen Thorpe, Joanne Walker, David G Jayne, Adrian MH Smith, Richard M Heath, and Julia M Brown. Short-term endpoints of conventional versus laparoscopic-assisted surgery in patients with colorectal cancer (MRC CLASICC trial): multicentre, randomised controlled trial. *The lancet*, 365(9472):1718–1726, 2005.
- [6] Clinical Outcomes Surgical Therapy Study of Group et al. A comparison of laparoscopically assisted and open colectomy for colon cancer. *The New England journal of medicine*, 350(20):2050, 2004.
- [7] Ruben Veldkamp, Esther Kuhry, WC Hop, J Jeekel, G Kazemier, H Jaap Bonjer, Eva Haglind, L Pahlman, Miguel A Cuesta, Simon Msika, et al. Laparoscopic surgery versus open surgery for colon cancer: short-term outcomes of a randomised trial. *Lancet Oncol*, 6(7):477–484, 2005.

- [8] Alberto Arezzo, Roberto Passera, Gitana Scozzari, Mauro Verra, and Mario Morino. Laparoscopy for rectal cancer reduces short-term mortality and morbidity: results of a systematic review and meta-analysis. *Surgical endoscopy*, 27(5):1485–1502, 2013.
- [9] Seung Duk Lee, Sung Chan Park, Ji Won Park, Dae Yong Kim, Hyo Seong Choi, and Jae Hwan Oh. Laparoscopic Versus Open Surgery for Stage I Rectal Cancer: Long-term Oncologic Outcomes. *World Journal of Surgery*, 37(3):646, 2013.
- [10] <http://www.medicalexpo.com>.
- [11] Garth H Ballantyne. The pitfalls of laparoscopic surgery: challenges for robotics and telerobotic surgery. *Surgical Laparoscopy Endoscopy & Percutaneous Techniques*, 12(1):1–5, 2002.
- [12] <http://www.laparoscopy.am>.
- [13] J. Heemskerk, R. Zandbergen, J. G. Maessen, J. W. M. Greve, and N. D. Bouvy. Advantages of advanced laparoscopic systems. *Surgical Endoscopy*, 20(5):730, 2006.
- [14] Simon DiMaio, Mike Hanuschik, and Usha Kreaden. *The da Vinci Surgical System*. Springer, 2011.
- [15] <http://www.intuitivesurgical.com>.
- [16] <http://www.robinheart.pl>.
- [17] Jacob Rosen, Mitchell Lum, Mika Sinanan, and Blake Hannaford. *Raven: Developing a Surgical Robot from a Concept to a Transatlantic Teleoperation Experiment*. Springer, 2011.
- [18] <http://www.washington.edu>.
- [19] Igmo Koo, Duc Trong Tran, Taehun Kang, Vo Gia Loc, Young Kuk Song, Chang Min Lee, and Hyouk Ryeol Choi. Control of a quadruped walking robot based on biologically inspired approach. In *IROS*, pages 2969–2974. IEEE, 2007.
- [20] Jérôme Szewczyk, V. de Sars, Philippe Bidaud, and G. Dumont. An Active Tubular Polyarticulated Micro-System for Flexible Endoscope. In Daniela Rus and Sanjiv Singh, editors, *ISER*, volume 271 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, pages 179–188. Springer, 2000.

- [21] Amir Degani, Howie Choset, Alon Wolf, and Marco A. Zenati. Highly Articulated Robotic Probe for Minimally Invasive Surgery. In *ICRA*, pages 4167–4172. IEEE, 2006.
- [22] Jan Peirs, Dominiek Reynaerts, Hendrik Van Brussel, Gudrun De Gerssem, and Hsiao-Wei Tang. Design of an advanced tool guiding system for robotic surgery. In *ICRA*, pages 2651–2656. IEEE, 2003.
- [23] Nabil Simaan, Russell H. Taylor, and Paul Flint. A Dexterous System for Laryngeal Surgery. In *ICRA*, pages 351–357. IEEE, 2004.
- [24] John Vogan, Andreas Wingert, Jean-Sebastien Plante, Steven Dubowsky, Moustapha Hafez, Dan Kacher, and Ferenc A. Jolesz. Manipulation in MRI Devices using Electrostrictive Polymer Actuators: with an Application to Reconfigurable Imaging Coils. In *ICRA*, pages 2498–2504. IEEE, 2004.
- [25] William M Kier and Kathleen K Smith. Tongues, tentacles and trunks: the bio-mechanics of movement in muscular-hydrostats. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 83(4):307–324, 1985.
- [26] Matteo Cianchetti, Tommaso Ranzani, Giada Gerboni, Iris De Falco, Cecilia Laschi, and Arianna Menciassi. STIFF-FLOP Surgical Manipulator: mechanical design and experimental characterization of the single module. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 3576–3581. IEEE, 2013.
- [27] <http://www.stiff-flop.eu>.
- [28] Jan Fraś, Jan Czarnowski, Mateusz Maciaś, and Jakub Głowka. *Static Modeling of Multisection Soft Continuum Manipulator for Stiff-Flop Project*. Springer, 2014.
- [29] John R. Amend, Eric Brown, Nicholas Rodenberg, Heinrich M. Jaeger, and Hod Lipson. A Positive Pressure Universal Gripper Based on the Jamming of Granular Material. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(2):341–350, 2012.
- [30] <http://www.axios3d.com>.
- [31] Robert J. Webster III and Bryan A. Jones. Design and Kinematic Modeling of Constant Curvature Continuum Robots: A Review. *I. J. Robotic Res.*, 29(13):1661–1683, 2010.

- [32] Thomas C. Searle, Kaspar Althoefer, Lakmal D. Seneviratne, and Hongbin Liu. An optical curvature sensor for flexible manipulators. In *ICRA*, pages 4415–4420. IEEE, 2013.
- [33] J. Fraś, J. Czarnowski, M. Maciaś, J. Główka, Member IEEE M. Cianchetti, and Member IEEE A. Menciassi. New STIFF-FLOP module construction idea for improved actuation and sensing. *ICRA 2015*, (w recenzji).
- [34] Praca zbiorowa. Tablice fizyczno-astronomiczne. 2013.
- [35] Martin Liggins II, David Hall, and James Llinas. *Handbook of multisensor data fusion: theory and practice*. CRC press, 2008.
- [36] Jan Czarnowski, Jan Fraś, Jakub Główka, Mateusz Maciaś, Adam Wołoszczuk, and Paweł Sałek. An intelligent data fusion system concept for the STIFF-FLOP project. *ICRA 2014 Soft Medical Robots Full Day Workshop*.
- [37] <http://commons.wikimedia.org>.
- [38] Dokumentacja systemu ROS.
- [39] <http://www.ros.org>.
- [40] Simon Puligny. ROS interface and URDF parser for Webots. Master’s thesis, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, 2014.
- [41] <http://www.pirobot.org>.
- [42] <http://www.shadowrobot.com>.
- [43] <http://www.keyence.com>.