## Niepewność pomiarowa ortezy

Na błąd pomiarowy ortezy główny wpływ mają kontrybutory wskazane w niniejszym rozdziale. Ich wpływ na niepewność urządzenia pomiarowego został rozważony, a uwzględnione czynniki wykorzystano do obliczenia niepewności znajomości położenia osi członów ruchomych konstrukcji względem stawu człowieka.

### Błędy geometryczne wynikające z tolerancji wykonawczej części.

Części ortezy pomiarowej zostały wykonane zgodnie z normami PN-EN-22768-1:1999 i -2:1999 [132, 133] w klasach dokładności f-H i m-K. Ich wymiary (w tym średnice, płaskość, prostopadłość, kątowość, bicie) mogą odbiegać od nominalnych. Prowadzi to do występowania liniowych i kątowych niepewności działania urządzenia. Pomimo niewielkich wartości większości odchyłek, zostały one uwzględnione w analizie niepewności pomiarowej urządzenia ze względu na ich szeregowe składanie w łańcuchu kinematycznym. Z tego powodu liczne niewielkie błędy nie zostały tu zaniedbane. Konkretne wartości możliwych odchyłek dla części tworzących łańcuch kinematyczny wpływający na położenie osi obrotów członów ortezy pomiarowej uwzględnione są w tabeli w dalszej części rozdziału. Jako odpowiednie odchyłki zastosowano zgodnie z normą wartości wynikające z długości wymiarów nominalnych oraz z wymiarowania na rysunkach wykonawczych części. W przypadku wymiarów wynikowych tolerancje są znacznie większe, jednak wzięto to pod uwagę przy projektowaniu i wymiary istotne dla pozycjonowania części są tolerowane wprost.

Biorąc pod uwagę tolerancję płaskości dokonano upraszczającego założenia, że płaskość równomiernie przechodzi od odchyłki maksymalnej do minimalnej na całej rozważanej powierzchni elementu, wprowadzając błędy kątowe w dwóch kierunkach.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.45) |

Gdzie:

- tolerancja płaskości;

- długości boków rozważanego elementu;

- odchyłki dolne długości boków;

- błędy kątowe wynikające z tolerancji płaskości.

x

z

y

Rysunek 5.60– Odchyłka płaskości skutkująca błędami kątowymi w dwóch osiach.

Jeśli do górnej powierzchni rozważanej części zostanie przymocowana kolejna część, nie będzie ona miała możliwości obrotu idealnie w płaszczyźnie x-y, z uwagi na błędy kątowe wprowadzone przez płaskość. Podczas obliczeń błędów montażu zaniedbano to jednak, gdyż z uwagi na mnożenie niewielkich kątów efekt jest pomijalnie mały.

### Błędy geometryczne wynikające z montażu części.

Błędy wynikające z montażu części prowadzą do ich położenia w przestrzeni innego niż nominalne. W ortezie pomiarowej maksymalne możliwe błędy montażu wynikają przede wszystkim z luzów występujących przed dokręceniem połączeń śrubowych. Otwory na śruby są większe niż średnica elementów złącznych, przez co przed dokręceniem pozycja łączonych części nie jest jednoznacznie ustalona. W ogólnym przypadku przy połączeniu śrubowym pary części mogą wystąpić przesunięcia liniowe w płaszczyźnie połączenia oraz obrót kątowy w płaszczyźnie połączenia bądź złożenie tych ruchów. Należy mieć na uwadze, że błąd kątowy orientacji może prowadzić do wystąpienia dodatkowych przemieszczeń liniowych z uwagi na występowanie ruchu na ramieniu. Zaniedbywane są błędy liniowe i kątowe wynikające z montażu w płaszczyznach innych niż płaszczyzna połączenia. Mogą one oczywiście wystąpić, na przykład. ze względu na odmienne momenty siły dokręcenia śrub, jednak są one uznawane za pomijalnie małe.

Rozważany jest punkt A znajdujący się na części mocowanej za pomocą 4 wkrętów. W nominalnym położeniu wkręty znajdują się pośrodku otworów przelotowych. Na rysunku przedstawiono rdzenie śrub, łby nie są zilustrowane.

x

y

x

y

x

y

Rysunek 5.61– Błędy liniowe i kątowe montażu części. a) Część w położeniu nominalnym, b) maksymalne przemieszczenie w poziomie i c) maksymalny obrót kątowy.

Maksymalne możliwe przesunięcie na luzach w otworach jest takie samo w poziomie jak w pionie, dlatego został zilustrowany tylko jeden przypadek. Rozważany jest możliwie najgorszy przypadek uwzględniający tolerancje wykonania.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.46) |

Gdzie:

- maksymalne błędy liniowe montażu w poziomie i w pionie;

- nominalna średnica otworu przelotowego;

- odchyłka górna średnicy otworu;

- nominalna zewnętrzna średnica gwintu śruby;

- odchyłka dolna średnicy zewnętrznej gwintu.

Należy jednak zauważyć, że jednocześnie nie może wystąpić maksymalne możliwe przesunięcie w pionie i w poziomie na rysunku. Otwory są okrągłe, zatem pole tolerancji wynikające z pozycjonowania na nich również jest okrągłe. Maksymalny błąd jest zatem określony wzorem.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.47) |

x

y

Rysunek 5.62– Pole tolerancji, maksymalne błędy w poziomie i pionie oraz maksymalny błąd całkowity w arbitralnym kierunku.

Błąd kątowy obrotu w płaszczyźnie połączenia zależy od większego wymiaru rozstawienia otworów. Przyjmowane jest uproszczenie zakładające symetryczny ruch w przeciwnych kierunkach na ramieniu równym większemu rozstawowi otworów.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.48) |

Gdzie:

– maksymalny błąd kątowy w płaszczyźnie połączenia;

- większy wymiar rozstawu otworów;

- odchyłka dolna większego wymiaru rozstawienia otworów.

Obrót prowadzi do wystąpienia składowych liniowych w pionie i poziomie. Ujęte są wartości dla rozważanego punktu A.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.49) |

Gdzie:

, - maksymalne błędy liniowe w poziomie i w pionie wynikające z obrotu;

; - odległości od środka obrotu do rozważanego punktu;

; ; - odchyłki górne i dolne odpowiednich wymiarów.

Używane we wzorze odchyłki dobrane są tak, by uzyskać najmniej korzystny przypadek, czyli największe przesunięcie od nominalnego położenia.

Dodatkowo przy obliczaniu przemieszczeń liniowych wynikających z błędu kątowego działającego na ramieniu należy uwzględnić długość całego łańcucha. Zilustrowano przypadek, w którym pierwsza część w łańcuchu wprowadza błąd kątowy. Kolejne części są idealne, ale z uwagi na to, że zwiększają one długość ramienia, ostatni element ma znaczące przesunięcie liniowe. Zjawisko to występuje z powodu zarówno niepewności montażu, jak i wykonania części, jednak uwidacznia się przy łączeniu części, dlatego zostało uwzględnione w niniejszym podrozdziale.

Część 2

(idealna)

Część 3

(idealna)

Część 4

(idealna)

Część 1

(idealna)

Część 1

(z błędem kątowym)

a)

b)

Rysunek 5.63– Wpływ błędu kątowego części na składowe liniowe położenie rozważanego punktu.

a) Części w ustawieniu nominalnym oraz b) z pierwszą częścią w łańcuchu wprowadzającą błąd kątowy i przesuwającą rozważany punkt na znacznym ramieniu bezbłędnych części.

Biorąc pod uwagę powyższe, obliczając błąd liniowy wynikający z błędów kątowych dla każdej części uwzględniano wszystkie poprzedzające części wprowadzające błędy kątowe wraz z odpowiednimi długościami ramion.

Podczas obliczania przemieszczeń liniowych wynikających z błędu kątowego działającego na ramieniu brano także pod uwagę wzajemne położenie części, bowiem niekiedy maksymalny kąt odchyłki od nominalnego nie skutkuje maksymalną składową liniową. Zjawisko to ma miejsce, kiedy łańcuch części „cofa się”, a kolejna cześć jest bliżej punktu początkowego łańcucha. Sytuacja taka ma miejsce w ortezie. Na ilustracji część 2 znajduje się w dwóch ekstremalnych orientacjach kątowych. W obu przypadkach jej kąt względem poprzedzającej ją części 1 jest taki sam co do modułu. Jednak największe przesunięcie liniowe rozważanego punktu występuje, gdy część nie jest obarczona największą odchyłką kątową względem swojego położenia początkowego.

b)

c)

Część 2

(idealna)

Część 2

(idealna)

Część 1w łańcuchu

(idealna)

Część 2

(idealna)

a)

Największy błąd kątowy orientacji części 2 nie powoduje największego przesunięcie liniowego punktu

Największe przesunięcie liniowe punktu w pionie, w sytuacji, gdy kąt orientacji części 2 jest bardziej zbliżony do nominalnego

Część 1 w łańcuchu

Część 1 w łańcuchu

Miejsce połączenia części

Rysunek 5.64– Wpływ błędu kątowego części na składowe liniowe położenie rozważanego punktu A. a) Części w położeniu nominalnym; b) największy błąd orientacji kątowej części 2 i c) największe przesunięcie liniowe punktu A.

W ortezie występują człony, których orientacja może być kalibrowana, to jest zmieniana kątowo na podstawie pomiarów przyrządem do wzorcowania. Pomimo wykonywania kalibracji, nie można pominąć błędu kątowego członów poprzedzających, gdyż mają one wpływ na błędy liniowe położenia kalibrowanego członu. Na ilustracji przedstawiono część 1, która jest obarczona błędem kątowym oraz kalibrowaną część 2. Poprawa orientacji drugiej części nie eliminuje jednak składowych liniowych błędu kątowego wynikającego z orientacji części 1. Oznacza to, że w rozważaniach związanych z ortezą nie można zaniedbać orientacji części poprzedzających kalibrowany człon, jeśli wprowadzają one ramiona.

Część 1w łańcuchu

b)

c)

Część 2

(nieskalibrowana)

Część 1w łańcuchu

(idealna)

Część 2

(idealna)

a)

Największy błąd kątowy orientacji części 2 nie powoduje największego przesunięcie liniowego punktu

Część 1w łańcuchu

Część 2

(skalibrowana)

Orientacja części 2 jest nominalna, jednak punkt nadal jest obarczony błędem liniowym

Rysunek 5.65– Kalibracja kątowa nie eliminuje składowych liniowych błędu wynikającego z poprzednich części w łańcuchu. a) Nominalne położenie części; b) część 1 z błędem kątowym i część 2 przed kalibracją i c) orientacja części 2 poprawiona wskutek kalibracji.

W ortezie nie są stosowane kołki ustalające, jednak liczne elementy są dosuwane do jednej lub dwóch krawędzi współpracującej części dla lepszego pozycjonowania i redukcji błędów montażu. Dzięki temu błędy kątowe i liniowe w połączeniach śrubowych części są znacznie mniejsze, niż wynikające z wzorów przestawionych wcześniej. Podczas montażu wykorzystywano dodatkową powierzchnię oporową do przesuwania części oraz elektroniczną suwmiarkę z działką 0,01 mm i osiągnięto dokładność nie gorszą niż 0,50 mm przy zgrywaniu krawędzi. W przypadku części dosuwanych do dwóch prostopadłych krawędzi założono, że błąd kątowy pozycjonowania jest zależny od dłuższej krawędzi. Podczas gdy przemieszczenia liniowe krawędzi zostały zmierzone, obroty kątowe zostały obliczone.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.50) |

Gdzie:

- błąd liniowy zgrywania krawędzi;

K – długość dłuższej współpracującej krawędzi;

- odchyłka dolna wymiaru dłuższej współpracującej krawędzi.

### Błędy geometryczne spowodowane podatnością części

Orteza pomiarowa nie jest nieskończenie sztywna, elementy konstrukcji odkształcają się elastycznie pod wpływam oddziałujących na urządzenie sił. Większość części ortezy wykonana jest z giętych blaszek. Grubość blachy została dobrana tak, by urządzenie było możliwie lekkie, a zarazem wystarczająco sztywne. Wybrane części zostały dodatkowo zagięte dla zwiększenia sztywności. W łańcuchu pomiarowym miejscem najbardziej narażonym na odkształcenie jest połączenie części o nazwie płytka zginania do karetki z płytką zginania liniową. W najbardziej niekorzystnym położeniu po wyjustowaniu części mogą być rozsunięte, powstaje wtedy ramię tworzone przez pojedynczą blaszkę. Obliczona została strzałka ugięcia utworzonej sprężyny płytkowej [112] (w obliczeniach zignorowano otwory w blaszce).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | przy czym | (5.51) |

Gdzie:

f - strzałka ugięcia sprężyny płytkowej;

- siła oddziałująca na koniec sprężyny;

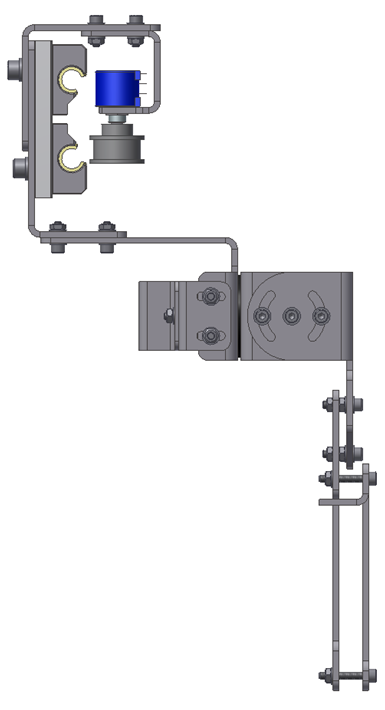
E - moduł Younga materiału sprężyny;

J - geometryczny moment bezwładności przekroju poprzecznego względem osi sprężyny;

l - długość ramienia sprężyny;

b - szerokość sprężyny;

g - grubość sprężyny.



l

P

Płytka zginania do karetki

Płytka zginania liniowa

Rysunek 5.66– Umiejscowienie najbardziej podatnej na odkształcenia części ortezy oraz rozważany układ obciążenia jak dla sprężyny płytkowej.

Dla płytki z aluminium o module Younga równym 69 GPa, ramieniu 50 mm, szerokości 70 mm i grubości 3 mm, na której koniec działa siła 50 N, strzałka ugięcia wynosi 0,08 mm. Wartość ugięcia w najbardziej narażonym miejscu jest bardzo mała. Rozważana sprężyna płytkowa nie jest oczywiście zamurowana, jednak występujące wcześniej w ciągu kinematycznym przewężenie również ma grubość 3 mm, ale stanowi znacznie krótsze ramię. Błędy związane z podatnością części ortezy uznano zatem za pomijalnie małe, zwłaszcza, że urządzenie współpracuje ze znacznie bardziej podatnym ciałem człowieka.

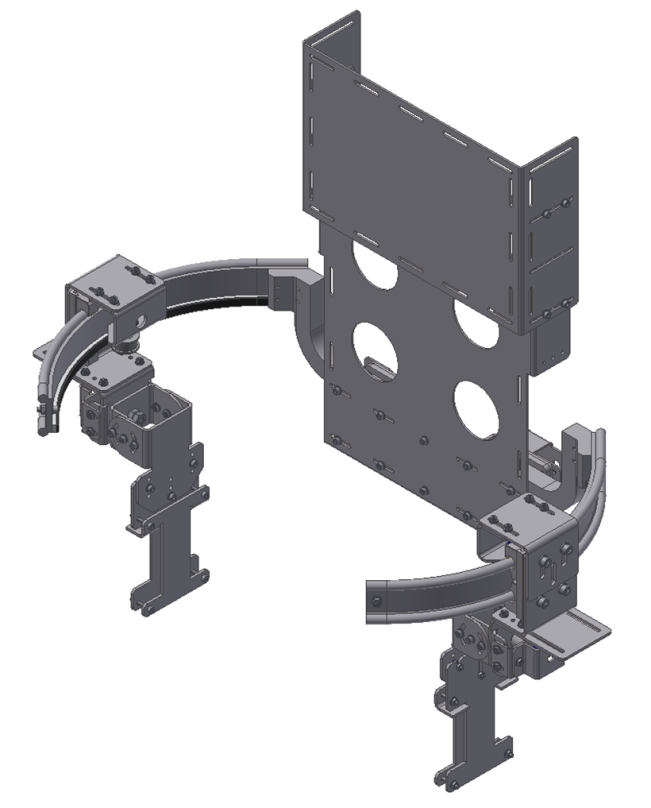
### Błędy wyjustowania i przytroczenia ortezy do człowieka

Podczas justowania położenia członów do użytkownika ich położenie dobrane jest tak, by zgrać przecinające się osie działania członów ze środkiem obrotu kości udowej w stawie biodrowym. Nie jest możliwe wizualne ocenienie ustawienia wprost, dlatego wymagane jest ustawienie zgrubne i opieranie się na informacji zwrotnej od użytkownika w celu jego poprawienia – źle zjustowane położenie osi prowadzi do uczucia „ciągnięcia” przez urządzenie w czasie ruchu z powodu przesunięć liniowych wprowadzanych w miarę obrotu oraz wzrostu oporów. Ustalenie poprawnej pozycji justowanych członów jest utrudnione z powodu braku wizualnego odniesienia. Nie da się zobaczyć ani stawu człowieka, ani osi działania urządzenia, dlatego ich wystarczające zgranie wymaga metody iteracyjnej. Justowane człony są ustawiane w przybliżonym położeniu, a następnie użytkownik wykonuje ruchy w pełnym dostępnym zakresie. Na podstawie odczuć użytkownika pozycje justowanych członów są korygowane.

Wykonano próby, w których wszystkie justowane człony poza jednym były ustawione w pozycji komfortowej dla użytkownika. Niewyjustowany człon był pierwotnie ustawiany na jednym krańcu zakresu i stopniowo przesuwany na przeciwny kraniec. Pozwoliło to porównać najgorsze ustawienie z najlepszym, a także oszacować zakres, w jakim użytkownik uważa ustawienie justowanego członu za wystarczająco dobre. Zakres ten, w porównaniu z całym zakresem justowania, jest dosyć duży i wynosi około 10 mm. Im bliżej środka zakresu, tym użytkownikowi urządzenia trudniej jest wskazać różnicę i to, czy zmiana ustawienia poprawia czy pogarsza komfort. Z jednej strony jest to niekorzystne, bowiem przesunięcie osi względem stawu wprowadza niepożądane składowe liniowe ruchów obrotowych, a wykrycie położenia bliskiego nominalnemu jest trudne i niejednoznaczne. Z drugiej strony oznacza to, że człony nie muszą być ustawione bardzo precyzyjnie, by z ortezy pomiarowej dawało się wygodnie korzystać, co stanowi korzystny obrót spraw.

Podobnie rozważono kątowe błędy zamocowania ortezy do ciała badanej osoby. Orteza ma oczywiście swoje przetworniki mierzące kąty, jednak ten pomiar nie jest w pełni wrażliwy na zamocowanie ortezy – urządzenie może być bowiem przytroczone nieprawidłowo zarówno do części plecowej, jak i kończyn dolnych badanej osoby. W takim przypadku cała orteza może być zamontowana krzywo, jednak człony pomimo tego mogą wskazywać kąty bliskie zerowym, doprowadzając do odczytów obarczonych błędami. Z tego powodu do określenia odchyleń kątowych wykorzystano cyfrową poziomicę jako narzędzie pomocnicze. Dobierając długości pasów mocujących ortezę do ciała człowieka dążono do tego, by jej część plecowa była zorientowana możliwie pionowo, a przetworniki wskazywały kąty bliskie zera dla badanej osoby stojącej w pozycji wyprostowanej. W przypadku przechyleń na boki błędy były niewielkie i nie przekraczały 2 stopni, natomiast przy pochyleniu przód-tył dochodziły do 4 stopni. Błędy obrotu wokół osi pionowej nie były możliwe do zmierzenia tą metodą. Ze względu na płaszczyznowe przywieranie płyty plecowej do pleców i używane stabilizatory kolanowe mocowane względem osi zginania stawu kolanowego, wyposażone w połączenia po bocznej zewnętrznej stronie uznano, że i tu błąd nie przekracza 2 stopni. Prawdopodobnie na tego rodzaju błędy wpływ mają także niesymetryczność ciała i wady postawy badanej osoby, których nie sposób było tu odseparować.

Błędy położenia osi mogą w ograniczonym stopniu być poprawiane dzięki możliwościom justowania urządzenia. Justowanie to pozwala jednak co najwyżej na liniowe ruchy wszystkich trzech osi związanych z jedną kończyną dolną równocześnie. Oznacza to, że w wyniku justowania nie jest możliwa zmiana wzajemnego położenia osi. Innymi słowy justowanie członów nie może doprowadzić do przecięcia się osi w punkcie. Z drugiej strony dzięki temu justowanie do użytkownika nie doprowadza do jeszcze dalszego oddalenia się osi względem siebie. Justowanie nie jest w pełni niezależne dla osi związanych z lewą i prawą kończyną dolną. Justowanie góra-dół oraz przód-tył wykonywane poprzez dobór wzajemnego położenia płyty plecowej i płyty tylnej wpływa na położenie obu grup osi równocześnie. Jedynie justowanie lewo-prawo poprzez przesuwanie węzłów odwodzenia jest niezależne. Z tego powodu jeśli wystąpią błędy między położeniem grup osi w pionie i w kierunku przód-tył, to justowanie członów nie pozwoli na ich wyeliminowanie. Przykładowo, jeśli jedna oś zginania będzie przesunięta w pionie względem drugiej, to justowanie w pionie pozwoli je przesuwać, jednak zachowując stałe niepożądane przesunięcie. Jeśli jednak osie przywodzenia/odwodzenia będą przesunięte w poziomie, to justowanie węzłów odwodzenia pozwoli skorygować ich położenie.



Możliwe wspólne justowanie góra/dół oraz przód/tył

Możliwe niezależne justowanie lewo/prawo

Możliwe justowanie liniowe położenia grup osi, jednak niemożliwe justowanie wzajemnego położenia osi w obrębie grupy

Rysunek 5.67– Możliwości zależnego i niezależnego justowanie położeń grup osi.

Ta zależność oznacza, że nie można poprzestać na rozważaniu tylko połowy urządzenia związanej z jedną kończyną dolną podczas analizy błędów. Takie uproszczenie doprowadziłoby do błędnego wniosku, że dzięki ruchom justerskim można zgrać liniowe położenie grupy wszystkich trzech osi ze stawem biodrowym człowieka. Wymagane jest tu zatem uwzględnienie błędów położenia odpowiadających sobie osi w obu sekcjach ortezy pomiarowej i świadomość, że dobre wyjustowanie położenia jednej osi może być niekorzystne dla drugiej osi z pary. Redukcję błędu zapewni ustawienie obu osi w podobnej odległości od nominalnej pozycji.

### Błędy przetworników pomiarowych oraz ich kalibracji

Potencjometry nie przetwarzają kąta obrotu na sygnał napięciowy w idealnie liniowy sposób. Karty katalogowe przetworników wskazują, jakim błędem nieliniowości są one obarczone. Można przypuszczać, że błąd nieliniowości jest równomiernie rozłożony w całym zakresie potencjometru. Wstępnie z tego powodu konserwatywnie uwzględniono błąd nieliniowości dla całego zakresu, pomimo tego, ze wykorzystywany jest mniejszy zakres. Potencjometry Bourns 51AAD-B24-A15L mierzące orientację członów przywodzenia/odwodzenia i prostowania/zginania mają błąd względny nieliniowości ±5% przy kącie obrotu 290±5o. Potencjometr Bourns 3590S-6-103L wykorzystywany do pomiaru orientacji osi rotacji biodrowej wewnętrznej/zewnętrznej ma błąd względny nieliniowości ±0,25% przy kącie obrotu 3600±10o. Błędy bezwzględne obliczone dla mniej korzystnych przypadków to zatem ±14,8o dla potencjometrów przywodzenia/odwodzenia i prostowania/zginania oraz ±9,0o dla potencjometrów rotacji biodrowej wewnętrznej/zewnętrznej. Wartości te są bardzo duże, biorąc pod uwagę pomiarowe zastosowanie potencjometrów w ortezie.

Wartości mierzone przez potencjometry są jednak dalej przetwarzane, możliwa zatem jest ich korekta, jeśli znana jest dokładniejsza orientacja wałka potencjometru i o ile błąd nieliniowości jest błędem systematycznym (powtarzalnym). Charakterystyka potencjometrów wykorzystywanych w ortezie pomiarowej została zmierzona co 10o w wykorzystywanym w urządzeniu zakresie za pomocą cyfrowego kątomierza (elektronicznego goniometru) o dokładności odczytu 0,1o. Po sprawdzaniu całego zakresu w obu kierunkach powrócono do początkowego ustawienia żeby zweryfikować, czy referencja nie poruszyła się. Na wykorzystywanym zakresie największe odchyłki kąta mierzonego przez ortezę od kąta odkładanego kątomierzem wynosiły ±0,9o dla przegubów przywodzenia/odwodzenia, ±1,2o dla przegubów prostowania/zginania oraz ±1,4o dla przegubów rotacji biodrowej. Wzięto pod uwagę najgorsze wyniki z pary potencjometrów wykorzystywanych do pomiaru odpowiedniego kąta dla lewej i prawej kończyny dolnej. Nie zmierzono histerezy nawet w przegubach rotacji wykorzystujących dodatkową przekładnię z pasem zębatym. Przypuszcza się, że histereza występuje, jednak jest niemierzalna przy pomocy używanego cyfrowego kątomierza ze względu na niewielka wartość. Błędy potencjometrów w wykorzystywanym zakresie są zatem mniejsze, niż dopuszczalne w ich specyfikacji, co jest korzystne dla działania ortezy pomiarowej i nie wymaga wprowadzania tabeli korekcyjnej.

Rozważono również błędy przetwarzania sygnału analogowego na cyfrowy wynikające z rozdzielczość przetwornika A/C. Mikrokontroler Arduino ma 10-bitowe przetworniki analogowo-cyfrowe, zatem kąt (a dokładniej spadek napięcia) odczytywany z potencjometru przypisywany jest do jednego z 210 = 1024 poziomów. Dotyczy to pełnego zakresu potencjometru. Dla potencjometru o nominalnym zakresie 290o jeden poziom odpowiada kątowi 0,3o, a dla potencjometru o zakresie 3600o odpowiada to 3,5o. W drugim przypadku należy jednak wziąć pod uwagę, że jest to kąt obrotu potencjometru, a nie kąt rotacji kończyny dolnej. Między kończyną dolną a potencjometrem zastosowana jest bowiem przekładnia. Nominalnie ruch rotacji biodrowej kończyny dolnej o 1o spowoduje obrót potencjometru o 16,2o. Z tego powodu błąd przetwornika analogowo-cyfrowego przekłada się na 0,2o błędu obrotu rotacji biodrowej kończyny dolnej.

Błędy kalibracji wynikają z niepewności ustalenia kątów rotacji członów urządzenia na krańcach zakresu ruchu. Zależą one od dokładności urządzenia wykorzystywanego do wzorcowania ortezy pomiarowej. Do tego celu wykorzystany był cyfrowy kątomierz o dokładności odczytu 0,1o, którym dokonywano pomiar na dwóch krańcach zakresu. Przyjęto błąd kalibracyjny ±0,5o w całym zakresie, większy niż wynikający z dokładności przyrządu kalibracyjnego ze względu na niepewności przy pomiarze, głównie przy odniesieniu przyrządu pomiarowego do referencji.

Opis ten nie wyczerpuje wszystkich błędów związanych z przetwornikami pomiarowymi. Rozważyć można dodatkowo błędy sprzęgnięcia potencjometrów z członami, gdzie wałki potencjometrów nie są osadzone doskonale równolegle i w osiach obrotów członów, których kąt obrotu mierzą. Innym źródłem błędów mogą być zmiany temperatury podczas funkcjonowania urządzenia, wpływające na parametry części elektrycznych i elektronicznych. Błędy te są jednak prawdopodobnie niewielkie w porównaniu z rozważonymi kontrybutorami i ich pominięcie nie jest niewłaściwe.

Błędy przetworników pomiarowych ortezy pomiarowej uznano za akceptowalnie małe. Dzięki przebiegowi zbliżonemu do liniowego nie jest konieczne wprowadzenie tablicy korekcyjnej odczytów potencjometrów, wystarcza kalibracja na dwa znane (czyli zmierzone dokładniejszym przyrządem pomiarowym) punkty na krańcach wykorzystywanego zakresu. Biorąc pod uwagę błędy nie ujęte wprost w analizie i dodatkowo uwzględniając, że potencjometry są urządzeniami stykowymi, zużywającymi się w czasie działania, konserwatywnie przyjęto niepewności potencjometrów nieco większe niż zmierzone, także w celu ujęcia błędów losowych wynikających z możliwych z szumów w analogowej części toru pomiarowego powodujących przeskoczenie odczytu do kolejnej działki z uwagi na działanie przetwornika A/C. A zatem znajomość orientacji wynosi ±1,7o dla przegubów przywodzenia/odwodzenia, ±2,0o dla przegubów prostowania/zginania oraz ±2,1o dla przegubów rotacji biodrowej.

Rozważając błędy związane z torem pomiarowym potencjometrów pod uwagę wzięto również błędy czasomierza, gdyż odczyty kątów są zwracane wraz ze stemplem czasowym. Zegar mikrokontrolera Arduino ma typową dokładność około 0,8% [81]. Błąd niemal 30 sekund po godzinie odmierzania czasu jest bardzo duży dla czasomierza. Przeprowadzono pomiar porównujący czas zwracany przez układ Arduino z czasem synchronizowanym z zegarem atomowym. Różnica dla egzemplarza mikrokontrolera wykorzystywanego w ortezie pomiarowej nie przekroczyła 8 sekund podczas żadnej z trzech godzinnych prób. Biorąc pod uwagę czas trwania pomiaru ortezą i mało dokładne bezwzględne szacowanie czasu przez człowieka (a zatem i rozbieżność czasu trwania i percepcji czynności) błąd czasomierza został uznany za pomijalny w tym zastosowaniu.

### Rozszerzalność cieplna

Orteza pomiarowa wykonana jest z aluminium, materiału konstrukcyjnego cechującego się dosyć dużym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej równym   
dla temperatury 20ºC. Przy założeniu zmiany temperatury o 10ºC zmiana długości części o nominalnej długości 500 mm, najdłuższej w urządzeniu, wynosi 0,1 mm. Z powodu niewielkiej wartości dalsze obliczenia temperaturowe zaniedbano, uznając wprowadzane błędy za pomijalnie małe.

### Tabela tolerancji urządzenia

Uwzględniając powyższe rozważania i obliczenia, dokonano analizy łańcucha tolerancji ortezy pomiarowej w celu obliczenia liniowych i kątowych niepewności znajomości położenia i orientacji osi obrotów członów konstrukcji. Rozważania przeprowadzono dla ortezy pomiarowej w położeniu początkowym odpowiadającym sytuacji, w której jej użytkownik przyjął pozycję swobodną wyprostowaną. Każda część w łańcuchu wprowadza niepewności liniowe i kątowe, wynikające z tolerancji wykonania i montażu. Dalsze części w łańcuchu są pozycjonowane przez części poprzedzające, dlatego propaguje się na nie błąd ich położenia i orientacji. Uwzględniony jest również kumulatywny błąd liniowy wynikający z ruchu na ramieniu w następstwie występowania błędów kątowych. Błędy są rozważane dla najgorszego możliwego przypadku, to jest ciągu tolerancji z każdą odchyłką maksymalną i odkładającą się w tym samym kierunku. Brane są pod uwagę możliwości justowania oraz kalibracji niektórych członów oraz to, czy justowanie jest niezależne od innych członów. W przypadku justowanych części rozważane jest ich niekorzystne ustawienie, to jest sytuacja kiedy części ustawione są tak, że tworzą się największe ramiona. Tabela pozwala wskazać maksymalne możliwe niepewności liniowe i kątowe znajomości pozycji i orientacji osi członów ruchomych ortezy pomiarowej. Rozważany jest mało prawdopodobny, acz nie niemożliwy przypadek, w którym wszystkie odchyłki w danej osi występują w tym samym kierunku, zawsze zwiększając błąd.

Pierwszy człon łańcucha można obarczyć niepewnościami położenia i orientacji całej ortezy pomiarowej, wynikającymi z jej zamocowania do człowieka. Zdecydowano się jednak tego nie robić, bowiem te błędy wpływają tak samo na całe urządzenie, powodujące takie same przemieszenia i obroty wszystkich części ortezy, co umożliwia ich wprowadzenie na końcu rozważań. Dzięki temu można obliczyć błędy ortezy pomiarowej bez wpływu jej zamocowania do człowieka i dodać je na końcu, co pozwala dogodniej ocenić kontrybutory błędów.

Obliczając niepewności pozycji i orientacji, w przypadku osi członów ruchomych ortezy pomiarowej może się wydawać, że przesunięcie wzdłuż nominalnego kierunku zorientowania osi nie wprowadza żadnych błędów części znajdującej się na niej. Tak jest jednak tylko, gdy oś nie jest obarczona błędem kątowym. W przypadku, kiedy oś jest przekoszona, przesunięcie wzdłuż jej nominalnego kierunku spowoduje wystąpienie poprzecznej składowej błędu – zależność tę zilustrowano dla lepszego wyjaśnienia. Z tego powodu błędy liniowe nie mogą być ignorowane nawet, jeśli dotyczą kierunku zgodnego z nominalnym kierunkiem osi.

x

y

x

y

x

y

x

y

a)

b)

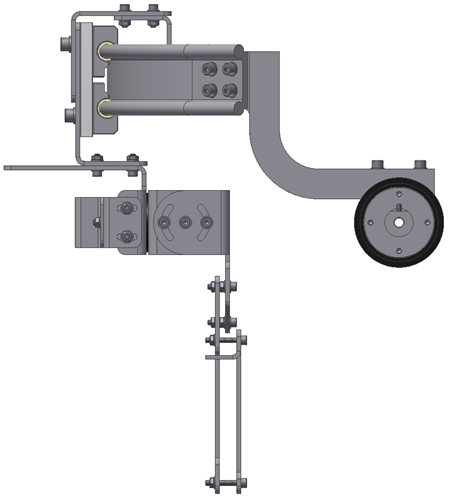
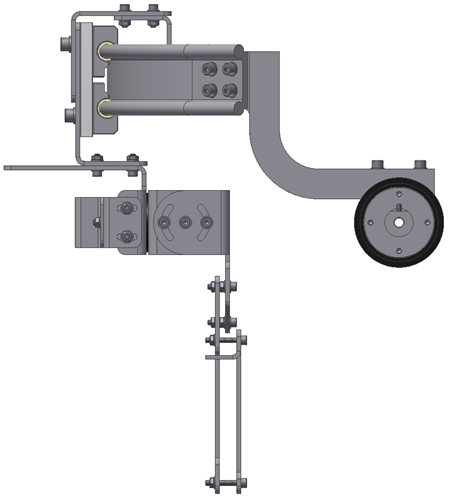
Część znajdująca się na osi obrotu

Przesunięcie osi obrotu w nominalnym kierunku y

Rysunek 5.68– Przesunięcie osi wzdłuż nominalnego kierunku w przypadku a) osi idealnej, które nie wprowadza błędów pozycjonowania części na osi i b) osi obarczonej błędem kątowym, które wprowadza poprzeczny błąd pozycjonowania części na osi.

W przypadku błędów kątowych osi, niektóre z nich mogą być zredukowane poprzez rotację członów poprzedzających w ramach kalibracji urządzenia. Oś rotacji przywodzenia/odwodzenia ortezy pomiarowej Y jest pierwszą w łańcuchu i nie ma możliwości zmiany jej orientacji. Oś rotacji biodrowej wewnętrznej/zewnętrznej Z może być rotowana wokół osi Y o kąt . Oś Y urządzenia może być obarczona błędem kątowym orientacji, przez co nie będzie to rotacja doskonale zgodna z rotacją wokół osi y bazowego układu odniesienia. Pomimo tego jeden z kątów orientacji osi Z może być zredukowany. Należy jednak wziąć pod uwagę, że o taki sam kąt zrotowana zostanie także oś prostowania/zginania ortezy pomiarowej X, znajdująca się dalej w łańcuchu kinematycznym. Kiedy zredukowany zostanie błąd obrotu osi Z, to oś X będzie nadal obarczona błędem orientacji względem osi Z. To jednak i tak korzystniejsza sytuacja, niż gdyby oś X była obarczona błędem wynikającym z długości całego łańcucha kinematycznego, a nie tylko jego odcinka rozpoczynającego się na osi Z. Podobnie błąd jednego kąta orientacji osi X może zostać poprawiony poprzez wprowadzenie obrotu o kąt wokół osi Z. Poprawki kątowe orientacji osi Z oraz X są wprowadzane podczas kalibracji ortezy pomiarowej.

Rysunek 5.69– Redukcja błędu orientacji osi Z poprzez wprowadzenie kalibrację obrotu członu wokół osi Y, widoczny taki sam wpływ na orientację osi X.



x

z

x

z

W tabelach poniżej przedstawiono niepewności liniowe i kątowe związane z wykonaniem oraz montażem części, niepewności liniowe będące skutkiem przemieszczeń występujących z uwagi na błędy kątowe oddziałujące na ramionach i w końcu całkowite niepewności liniowe i kątowe znajomości pozycji i orientacji części w łańcuchu kinematycznym. Kolorami zaznaczono, gdzie w łańcuchu znajdują się osie kolejno przywodzenia/odwodzenia, rotacji biodrowej wewnętrznej/zewnętrznej i prostowania/zginania. Wartości oznaczone dywizem nie mają wpływu na dokładność położenia lub orientacji osi urządzenia. Jest tak z uwagi na to, że możliwe jest justowanie opisane wcześniej bądź części nie wpływają na położenie osi, gdyż znajdują się za nimi w łańcuchu kinematycznym. Wybrane wartości błędów podano w nawiasach do referencji.

Tabela 5.25 – Niepewności liniowe i kątowe wykonania części.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nr | Nazwa części | ± Niepewność liniowa [mm] | | | ± Niepewność kątowa [o] | | |
| x | y | z |  |  |  |
| 1 | Płyta tylna1 | - (0,15) | 0,3 | 0,15 | 0,04 | - (0,29) | 0,06 |
| 2 | Płytka odwodzenia | - (0,25) | 0,05 | 0,1 | 0,08 | - (0,29) | 0,06 |
| 3 | Tuleja ślizgowa odwodzenia2 | - (0) | 0,05 | 0 | 0 | - (0) | 0 |
| 4 | Wałek odwodzenia3 | - (0,1) | 0,1 | 0,2 | 0,05 | - (0) | 0,05 |
| 5 | Kątownik tylny lewy/prawy | 0,25 | 0,25 | 0,15 | 0,14 | 0,14 | 0,54 |
| 6 | Zakrzywiona prowadnica (do karetki/do osi obrotu Z)4 | 0,3/0,95 | 0,5/0,85 | 0,3/0,3 | 0,03/0,03 | 0,17/0,17 | 0,56/0,56 |
| 7 | Karetka prowadnicy5 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,16 | 0,14 | 0,16 |
| 8 | Płytka zginania do karetki | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,08 | 0,56 | 0,08 |
| 9 | Płytka zginania liniowa | 0,15 | 0,15 | 0,25 | 0,08 | 0,59 | 0,08 |
| 10 | Tuleja ślizgowa zginania2 | 0,05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | Wałek zginania3 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | - (0) | 0,06 | 0,06 |
| 12 | Od płytki kątowej zginania do stabilizatora | - (brak wpływu na położenie osi urządzenia) | | | | | |

Tabela 5.26 – Niepewności liniowe i kątowe montażu części.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nr | Nazwa części | ± Niepewność liniowa [mm] | | | ± Niepewność kątowa [o] | | |
| x | y | z |  |  |  |
| 1 | Płyta tylna | - (0) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | Płytka odwodzenia | - (0,5) | 0 | 0,1 | 0 | - (0,60) | 0 |
| 3 | Tuleja ślizgowa odwodzenia | - (0) | 0 | 0 | 0 | - (0) | 0 |
| 4 | Wałek odwodzenia | - (0,15) | 0 | 0,15 | 0 | 0,2 | 0 |
| 5 | Kątownik tylny lewy/prawy | 0,25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | Zakrzywiona prowadnica (do karetki/do osi obrotu Z) | 0,18/0,18 | 0,18/0,18 | 0,25/0,25 | 1,01/1,01 | 1,01/1,01 | 0/0 |
| 7 | Karetka prowadnicy | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,16 | 0,23 | 0,2 |
| 8 | Płytka zginania do karetki | 0 | 0,25 | 0,25 | 0,40 | 0 | 0 |
| 9 | Płytka zginania liniowa | - (0,5) | 0,25 | 0 | 0 | 0 | 0,57 |
| 10 | Tuleja ślizgowa zginania | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | Wałek zginania | 0 | 0,102 | 0,102 | 0,2 | 0 | 0 |
| 12 | Od płytki kątowej zginania do stabilizatora | - (brak wpływu na położenie osi urządzenia) | | | | | |

Tabela 5.27 – Niepewności liniowe (kumulatywne) wynikające z błędów kątowych wykonania i montażu części działających na ramionach.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nr | Nazwa części | ± Niepewność liniowa [mm] | | |
| x | y | z |
| 1 | Płyta tylna | 0 | 0 | 0 |
| 2 | Płytka odwodzenia | 0,01 | 0 | 0,01 |
| 3 | Tuleja ślizgowa odwodzenia | 0,02 | 0 | 0,02 |
| 4 | Wałek odwodzenia | 0,12 | 0,05 | 0,07 |
| 5 | Kątownik tylny lewy/prawy | 0,66 | 1,99 | 0,78 |
| 6 | Zakrzywiona prowadnica (do karetki/do osi obrotu Z) | 3,28/3,28 | 3,95/1,68 | 6,04/5,44 |
| 7 | Karetka prowadnicy | 3,28 | 4,49 | 6,67 |
| 8 | Płytka zginania do karetki | 1,88 | 2,58 | 6,10 |
| 9 | Płytka zginania liniowa | 1,35 | 0,60 | 5,08 |
| 10 | Tuleja ślizgowa zginania | 1,35 | 0,61 | 5,09 |
| 11 | Wałek zginania | 1,35 | 0,53 | 5,02 |
| 12 | Od płytki kątowej zginania do stabilizatora | - (brak wpływu na położenie osi urządzenia) | | |

Tabela 5.28 – Niepewności liniowe i kątowe znajomości pozycji i orientacji części.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nr | Nazwa części | ± Niepewność liniowa [mm] | | | ± Niepewność kątowa [o] | | |
| x | y | z |  |  |  |
| 1 | Płyta tylna | 0 | 0,30 | 0,15 | 0,04 | 0 | 0,06 |
| 2 | Płytka odwodzenia | 0,01 | 0,35 | 0,36 | 0,12 | 0 | 0,12 |
| 3 | Tuleja ślizgowa odwodzenia | 0,02 | 0,40 | 0,37 | 0,12 | 0 | 0,12 |
| 4 | Wałek odwodzenia | 0,12 | 0,55 | 0,77 | 0,17 | 0,20 | 0,17 |
| 5 | Kątownik tylny lewy/prawy | 1,16 | 2,74 | 1,63 | 0,31 | 0,34 | 0,71 |
| 6 | Zakrzywiona prowadnica (do karetki/do osi obrotu Z) | 4,26/4,81 | 5,38/3,46 | 7,44/6,84 | 1,36/1,36 | 1,53/1,53 | 1,27/1,27 |
| 7 | Karetka prowadnicy | 4,56 | 6,32 | 8,47 | 1,68 | 1,90 | 1,63 |
| 8 | Płytka zginania do karetki | 3,31 | 4,81 | 8,30 | 2,16 | 2,46 | 1,71 |
| 9 | Płytka zginania liniowa | 2,93 | 3,23 | 7,53 | 2,24 | 3,05 | 2,36 |
| 10 | Tuleja ślizgowa zginania | 2,98 | 3,24 | 7,54 | 2,24 | 3,05 | 2,36 |
| 11 | Wałek zginania | 3,08 | 3,36 | 7,67 | 2,44 | 3,11 | 2,42 |
| 12 | Od płytki kątowej zginania do stabilizatora | - (brak wpływu na położenie osi urządzenia) | | | | | |

1 Płyta tylna jest obarczona niepewnościami wykonania, pomimo tego, że jest pierwszą częścią w łańcuchu. Założono, że choć jej przednia strona może być odniesieniem, to tylna strona, do której przytwierdzane są kolejne części, wykonana została z pewnymi tolerancjami, a zatem wprowadza niepewność.

2 Tuleje ślizgowe wykonane są z plastiku i wciskane w pasowane otwory. Założono, że poza niepewnością grubości nie wprowadzają one dodatkowych błędów, gdyż przyjmują kształt otworu, w którym są osadzone. Uwzględniono jednak luzy pasowania następnej części (to jest wałka) w tulejce.

3 W przypadku wałków tolerancje wykonania względem ich osi obrotu w ortezie są pomijalne – są one montowane względem wykonanej, a nie nominalnej powierzchni. Wałki nie są obarczone błędami przetworników pomiarowych, gdyż przy montażu urządzenia wykorzystywano cyfrowy kątomierz do kalibracji, oferujący lepszą dokładność i to jego błąd wpływa na orientację wałków.

4 Zakrzywiona prowadnica ma dwie osobne wartości każdej niepewności – odpowiednio do karetki w położeniu środkowym i do osi obrotu Z. Odmienne tolerancje położenia liniowego dla karetki i osi Z zakrzywionej prowadnicy wynikają z przedziału tolerancji promienia zaokrąglenia prowadnicy i sposobu jej zamocowania w pobliżu jednego z końców części. Na rysunku zilustrowano tę sytuację.

Odchyłka górna i dolna promienia krzywizny prowadnicy

Punkt zamocowania zakrzywionej prowadnicy

Rysunek 5.70– Różnica pól tolerancji nominalnego położenia karetki i osi zakrzywionej prowadnicy.

5 Nie są znane tolerancje wykonania karetki prowadnicy, bo producent nie udostępnił jej rysunku technicznego. Założono, że wykonano ją z tolerancjami m-K, tak samo jak zakrzywioną prowadnicę. W przypadku karetki uwzględniono wszystkie trzy niepewności kątowe, pomimo tego, że kąt obrotu wokół osi Z jest kalibrowany. Wynika to z zależności między kątem obrotu karetki a jej położeniem liniowym na prowadnicy. W wyniku kalibracji karetka znajduje się na środku prowadnicy, ale jej wierzchnia płytka montażowa, do której mocowane są kolejne części, może być skrzywiona z powodu tolerancji wykonania.

Niepewności położenia i orientacji osi członów ruchomych ortezy pomiarowej są zbliżone do oczekiwanych po tego rodzaju i wielkości konstrukcji. Niepewności kątowe orientacji części nie odbiegają znacząco od siebie, niepewności względem osi x i z są bardzo podobne, podczas gdy niepewność względem osi y jest nieco większa. W przypadku niepewności liniowych, zbliżone są wartości w osiach x i y, a niepewności w osi z są większe. Z powodu układu części w przestrzeni, wyraźny jest wpływ błędów kątowych wprowadzających ruch liniowy na ramieniu, stosunkowo niewielkie wartości kątowe doprowadzają bowiem do niepomijalnych przesunięć liniowych z uwagi na długie ramiona. Ze względu na kształt urządzenia, którego człony rozpościerają się na podobne odległości w kierunkach x i y, błąd ten jest największy w kierunku z – jego wartość jest około dwukrotnie większa niż w pozostałych kierunkach. Dużymi kontrybutorami niepewności są części handlowe, cechujące są gorszymi tolerancjami ogólnymi wykonania od części zaprojektowanych. Na położenie dalszych członów wpływ ma szeregowe połączenie części, w którym niepewności części poprzedzających przenoszą się na następne. Należy zważyć, że obliczony został najgorszy przypadek składania się niepewności. W rzeczywistości ich tak niekorzystne złożenie jest mało prawdopodobne, jednak celem tych rozważań było wyliczenie tego właśnie najgorszego przypadku – na tej podstawie można bowiem wskazać, że właściwości metrologiczne ortezy pomiarowej są nie gorsze od obliczonych.

Niepewności urządzenia można by zredukować poprzez zastosowania w następnej wersji konstrukcji kołków ustalających i pasowań w celu bardziej dokładnego łączenia części, co jednak wiąże się z większym skomplikowaniem konstrukcji. Podobnie zapewnienie możliwości niezależnego justowania położenia i orientacji osi obrotów członów umożliwiłoby zmniejszenie niepewności, jednak wymagałoby wprowadzenia pewnej liczby dodatkowych ruchomych części. Trzecim podstawowym sposobem redukcji niepewności byłoby zastosowanie dokładniejszych przetworników pomiarowych i wykonanie kalibracji obarczonej mniejszym błędem. Działania te nie są konieczne, bowiem i tak ostateczne błędy ustawienia osi wynikają w głównej mierze nie z projektu i wykonania ortezy pomiarowej, a jej połączenia z człowiekiem. Korzystniejszym rozwiązaniem wydaje się pozyskanie dokładniejszej informacji o położeniu osi ortezy pomiarowej. Do tego celu mogłaby zostać wykorzystana współrzędnościowa maszyna pomiarowa, za pomocą której możliwe byłoby zmierzenie położenia środków obrotów członów z wielokrotnie węższymi zakresami niepewności niż obliczone przypadki maksymalne.

### Wartości liczbowe kątowej i liniowej niepewności

Znajomość niepewności położenia i orientacji osi członów urządzenia w pozycji początkowej umożliwia przeprowadzenie dalszych obliczeń wykorzystujących wzory wyprowadzone w poprzednim rozdziale. Orteza pomiarowa jest mocowana do człowieka za pośrednictwem ramiączek i pasów plecaka oraz pasów należących do stabilizatorów kolanowych. Ten sposób polaczenia nie jest bardzo sztywny, a ponadto urządzenie pomiarowe nie jest wiązane z kośćmi, a jedynie powierzchniowo z tkanką miękką. Osie urządzenia mogą nie być ortogonalne ani przecinać się w punkcie, a ponadto nie są doskonale wyjustowane względem środka stawu biodrowego człowieka. Prowadzi to do możliwości występowania niepożądanych przemieszczeń między ciałem człowieka a członami urządzenia pomimo tego, że w pozycji początkowej człony są odpowiednio wyjustowane.

Wyprowadzone wcześniej zależności pozwalają obliczyć błąd liniowy i kątowy związany z działaniem ortezy, której osie nie są ortogonalne i są przesunięte względem środka obrotu części udowej kończyny dolnej człowieka. Osie urządzenia są obarczone błędami, a ich położenie w przestrzeni nie jest w istocie znane – obliczone są jednak zakresy niepewności dotyczące ich położenia liniowego i orientacji kątowej. Wymagane jest określenie, jakie wartości obrotów kątowych oraz przesunięć liniowych osi ortezy pomiarowej wprowadzić do obliczeń w celu obliczenia niepewności pomiarowej urządzenia, potrzebna jest zatem analiza, jakie wartości brzegowe będą skutkować najmniej korzystnymi wynikami, to jest największymi wartościami błędów.

Zarówno w przypadkach przesunięć liniowych, jak i błędów kątowych orientacji osi, brane są ich wartości ekstremalne, gdyż one owocują największymi niepewnościami. Na rysunku przedstawiono przypadek ruchu w płaszczyźnie. Zilustrowana jest trajektoria ruchu po wycinku okręgu o nominalnym środku oraz trajektorie ruchu o środku przesuniętym w granicach pola niepewności, które jest tu pionowe. Ekstremalne trajektorie dla największego co do modułu błędu wyróżniono kolorem czerwonym. Dla tych właśnie trajektorii następują największe przesunięcia liniowe względem trajektorii nominalnej.

Nominalny środek obrotu oraz zakres niepewności

Trajektorie ruchu względem nominalnego środka obrotu (pośrodku) oraz przesuniętego

Błąd liniowy, przesunięcie między punktem na kończynie dolnej a na ortezie pomiarowej

Rysunek 5.71– Porównanie trajektorii ruchu względem nominalnego środka obrotu i środka przesuniętego w granicach pionowego pola niepewności.

Wskazane wcześniej niepewności ortezy pomiarowej, wynikające głównie z nieliniowości przetworników pomiarowych oraz dokładności wykonania i montażu części urządzenia, zostały rozwinięte o niepewności liniowe i kątowe przytroczenia urządzenia do człowieka. W ten sposób uzyskano wartości niepewności położenia liniowego i orientacji kątowej wszystkich trzech osi urządzenia względem środka stawu biodrowego, a także niepewność pomiaru obrotu względem każdej osi.

Tabela 5.29 – Niepewności liniowe i kątowe znajomości pozycji i orientacji osi.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nr | Nazwa osi | ± Niepewność liniowa [mm] | | | ± Niepewność kątowa [o] | | |
| x | y | z |  |  |  |
| 1 | Oś przywodzenia/odwodzenia Y | 5,12 | 5,55 | 5,77 | 4,17 | 1,71 | 2,17 |
| 2 | Oś rotacji biodrowej wewnętrznej/zewnętrznej Z | 9,81 | 8,46 | 11,84 | 5,36 | 3,53 | 2,11 |
| 3 | Oś prostowania/zginania X | 8,08 | 8,36 | 12,67 | 2,01 | 5,11 | 4,42 |

1 Niepewność pomiaru kąta obrotu mierzona względem osi przetwornika pomiarowego od skalibrowanej orientacji zerowej, nie dokładnie w osi wskazanej w tabeli.

W obliczeniach przyjęto długość łącznika udowego równą 175 mm i odległość od środka stawu biodrowego równą 100 mm.

W przypadku ruchu złożonego w przestrzeni występują niepewności liniowe oraz kątowe w trzech osiach. Prowadzi to do sytuacji, w której wybór najgorszego przypadku nie jest trywialny. Występują bowiem przypadki, w których składowe liniowe ruchów kątowych mogą być skierowane w przeciwne strony niż błędy liniowe położenia osi, co prowadzi do redukcji błędów. W trakcie tych rozważań nie jest to pożądany przypadek, bowiem poszukiwane są największe wartości niepewności. Z tego powodu zdecydowano się na przeprowadzenie obliczeń dla wybranych kombinacji ekstremalnych błędów liniowych i kątowych w osiach x, y i z dla kątów orientacji zmierzonych przez człony ortezy , i w ich pełnym zakresie z rozdzielczością 10o. Następnie spośród tych przypadków dla każdego punktu wybrano wartość błędu największą co do modułu.

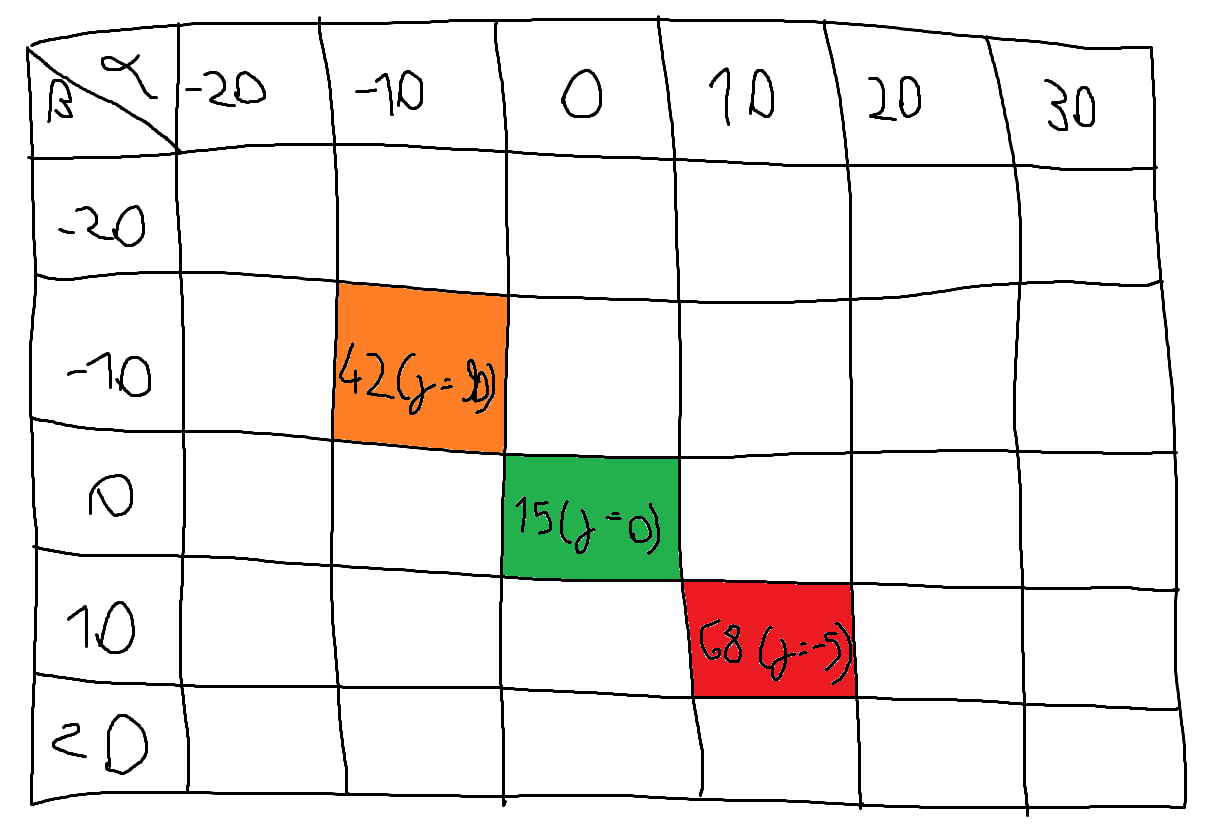
Ze względu na liczbę możliwych przypadków, nie sprawdzano wszystkich możliwych kombinacji – byłyby bowiem bardzo liczne, gdyż każda z trzech osi urządzenia ma trzy liniowe stopnie swobody, dwa kątowe (pomijany jest tu obrót w mierzonej osi, uwzględniony jako błąd przetworników pomiarowych) i dwie ekstremalne wartości niepewności dla każdego stopnia swobody. Gdyby sprawdzać każdy możliwy przypadek, konieczne byłoby przeprowadzanie 215 = 32768 obliczeń dla każdego zestawu 3 kątów wejściowych. Dla ograniczenia przypadków rozważono te, w których osie liniowo przesunięte są tak samo, to jest wszystkie trzy ekstremalnie wzdłuż każdej z trzech osi, co daje 8 położeń liniowych. Podobnie postąpiono dla odchyleń kątowych, przyjmując ekstremalne obroty w tych samych kierunkach, rozważanych jest zatem 8 przypadków. Ich iloczyn daje 64 przypadki rozważane dla każdego zestawu 3 kątów wejściowych. Są to niezaprzeczalnie uproszczenia, jednak nie bez uzasadnienia – osie urządzenia nie są swobodne i po jego montażu nie przemieszczają się względem siebie w znaczącym stopniu, nawet podczas justowania. Całe urządzenie jest mocowane na człowieku, co powoduje wspólny ruch liniowy i kątowy wszystkich osi. Najgorsza sytuacja, czyli największe przesunięcia od środka stawu człowieka, nastąpiłyby jeśli kierunki przemieszczeń wynikające z niepewności ortezy i błędów jej przytroczenia do człowieka złożą się w tym samym kierunku, a właśnie taki przypadek jest to rozważany.

Tabela 5.29 – Rozważane kombinacje niepewności liniowych i kątowych pozycji i orientacji osi.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Numer | Znak odchyłek liniowych | | | Znak odchyłek kątowych | | |
| x | y | z |  |  |  |
| 1 | + | + | + | + | + | + |
| 2 | + | + | - | + | + | + |
| 3 | + | - | + | + | + | + |
| 4 | + | - | - | + | + | + |
| 5 | - | + | + | + | + | + |
| 6 | - | + | - | + | + | + |
| 7 | - | - | + | + | + | + |
| 8 | - | - | - | + | + | + |
| 9 | + | + | + | + | + | - |
| ··· | | | | | | |
| 17 | + | + | + | + | - | + |
| ··· | | | | | | |
| 64 | - | - | - | - | - | - |

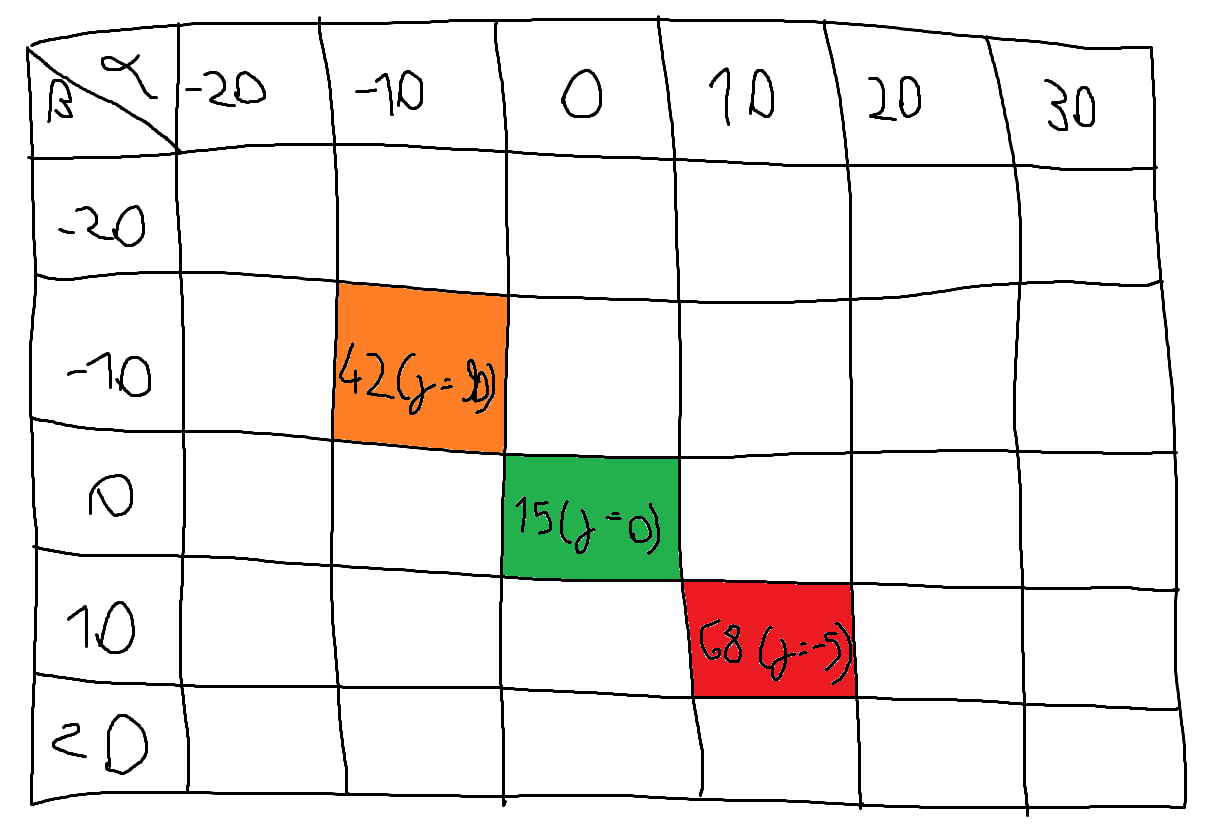
Kątowe niepewności przedstawiono w zależności od odczytywanych przez urządzenie kątów , i . Ze względu na 3 wartości wejściowe kątów i płaskie wizualizacje, konieczne było rozbicie i przedstawienie wybranych przypadków do wygodnego odczytu. Niepewności obliczono dla środka i krawędzi zakresów oraz wartości kątów wejściowych co 10o. Wyniki zwizualizowano w tabeli zależnie od kątów i , podając maksymalne wartości i w nawiasie kąt , dla jakiego wystąpiły. Wszystkie przypadki, to jest zawierające osobne tabele dla każdej rozważanej wartości i , są w załączniku. Takie podejście pozwoliło zilustrować najistotniejsze wyniki, nie zabierając dużo miejsca.

Tabela 5.29 – Maksymalna kątowa niepewność pomiarowa ortezy w zależności od kątów , i .



Analogicznie zilustrowano największe występujące przemieszczenia liniowe pomiędzy łącznikiem udowym urządzenia a ciałem człowieka. Również tutaj podano największe, najmniej korzystne wartości, pełne wyniki umieszczając w załączniku.

Tabela 5.29 – Maksymalne przemieszczenia liniowe łącznika udowego ortezy w zależności od kątów , i .



Niepewność pomiarowa urządzenia jest znacząca. Największy błąd względny dochodzi do XXX%. Duża część błędów wynika z niepewności zgrania osi między urządzeniem a człowiekiem. Można przypuszczać, że w czasie pomiarów niepewności wynikające z tolerancji wykonania i montażu urządzenia są stałe. Dodatkowo niepewności wyjustowania również będą stałe po odpowiednim ustawieniu urządzenia i w obrębie pomiarów przeprowadzanych na jednej osobie. Prowadzi to do wniosku, że choć absolutne wartości nie są mierzone bardzo dokładnie, w głównej mierze z powodu występowania ciała człowieka w łańcuchu pomiarowym, to powtarzalność urządzenia jest wystarczająca. Ta cecha dobrze współdziała z zamierzonym zastosowaniem urządzenia, czyli pomiarami ruchów złożonych kończyny dolnej i akwizycji trajektorii, które potem będą mogły być odtworzone przez układ skrętu robota ortotycznego o takim samym układzie kinematycznym.