

INNOWACYJNA METODA IDENTYFIKACJI EKSPERYMENTALNEJ DEFORMACJI OPON POJAZDÓW

CZĘŚĆ 2: NOWATORSKI PRZETWORNIK DO POMIARU 3 SKŁADOWYCH DEFORMACJI OPON POJAZDÓW

PIOTR DUDZIŃSKI¹, JAKUB CHOŁODOWSKI²

Politechnika Wroclawska

Streszczenie

Stan techniki w dziedzinie przetworników i metod pomiaru deformacji ogumienia wskazuje na szerokie znaczenie rozpatrywanego zagadnienia. Pod pojęciem tym rozpatrywać można zarówno globalną deformację struktury opony, jak i lokalne odkształcenie pojedynczych łamelek bieżnika. Brak jest przetwornika uniwersalnego, zdolnego do jednoczesnej identyfikacji wszystkich interesujących badaczy składowych deformacji opony w podanych wyżej aspektach. Definiując deformację ogumienia jako wartość przemieszczenia wybranego punktu opony względem obręczy koła, jej pomiar jest możliwy z pomocą urządzenia w myśl przedstawionej w niniejszym artykule autorskiej koncepcji mechanicznego przetwornika dotykowego. Przetwornik przeznaczony jest do pomiaru deformacji opony z podziałem na trzy rejestrowane jednocześnie składowe w kierunkach: stycznym, poprzecznym i promieniowym do tarczy koła jezdnego. W artykule przedstawiono opracowany ogólny model matematyczny urządzenia, wskazano na różnorodność sposobów formalnego opisu tego modelu, podając przy tym możliwe przykłady. Zaprezentowano także przykłady ścieżek realizacji koncepcji urządzenia. Urządzenie pomiarowe w myśl idei stanowić może narzędzie do identyfikacji parametrów mechanicznych ogumienia stanowiących m.in. dane wejściowe w badaniach symulacyjnych pojazdów, np. modelowaniu drgań ich nadwozi, czy energochłonności ruchu.

Słowa kluczowe: deformacja opon, pomiar składowych deformacji opony, składowa promieniowa/poprzeczna/styczna deformacji opony, mechaniczny dotykowy przetwornik deformacji opony

¹ Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Maszyn Roboczych i Pojazdów Przemysłowych, bud. B-5, ul. Łukasiewicza 7/9, 50-370 Wrocław, e-mail: piotr.dudzinski@pwr.edu.pl, +48 tel. 71 321 53 96

² Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Maszyn Roboczych i Pojazdów Przemysłowych, bud. B-5, ul. Łukasiewicza 7/9, 50-370 Wrocław, e-mail: jakub.cholodowski@pwr.edu.pl, tel.+48 500 22 11 96

1. Wstęp

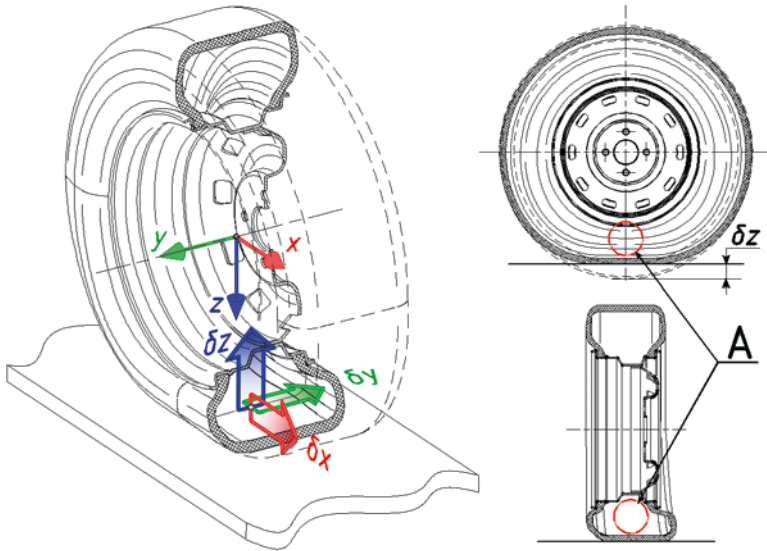
Pośród rozwiązań znanych ze stanu techniki zauważalnym jest brak przetwornika deformacji ogumienia wolnego od niedo-godności. W szczególności brak jest urządzenia pozwalającego na kompleksowy pomiar deformacji przy zachowaniu relatywnie małego stopnia skomplikowania algorytmu obliczeniowego [9]. Cechy te połączono w autorskiej koncepcji mechanicznego przetwornika dotykowego. Stan techniki w dziedzinie przetworników do pomiaru deformacji ogumienia ilustruje rozległość zagadnienia [9]. Wobec niejednoznaczności rozpatrywanego problemu, proces projektowania przetwornika deformacji ogumienia rozpoczęto przez zdefiniowanie założeń wyznaczających kształt rozwijanej koncepcji opisanej w treści artykułu.

2. Założenia projektowe

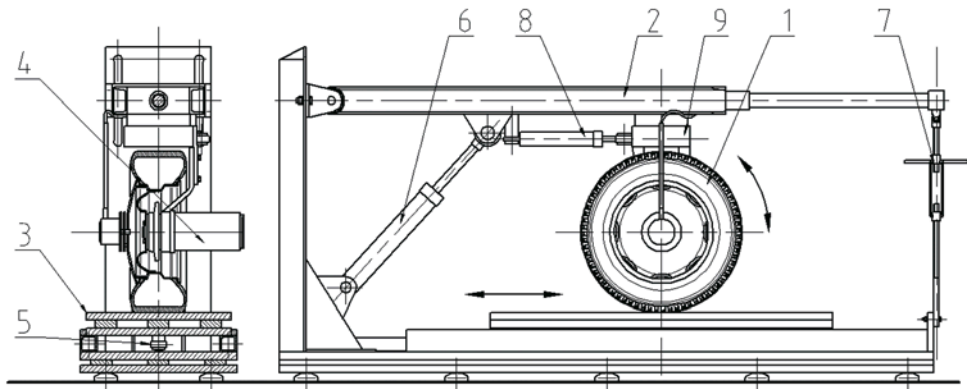
W ramach niniejszej pracy deformację ogumienia definiuje się jako przemieszczenie wybranego punktu wewnętrznej walco-wej powierzchni opony względem układu odniesienia związanego z obręczą koła (x, y, z , rys. 1). Głównym przeznaczeniem prezentowanego w artykule przetwornika jest prowadzenie pomiarów deformacji ogumienia w warunkach stanowiska do badania kół jezdnych napędzanych lub swobodnie przetaczanych po różnego rodzaju nawierzchni.

Stanowisko w przedstawionej konfiguracji (rys. 2.) umożliwia badanie opon pojazdów samochodowych i przemysłowych o średnicy zewnętrznej nieprzekraczającej 680 mm. Wyjściowo nawierzchnię stanowi metalowa powierzchnia ruchomej płyty (3) do pomiaru składowych reakcji w styku opony z nawierzchnią. Ponadto identyfikacji podlegać może proces współpracy opony z innego typu podłożem podatnym lub sztywnym, np. glebą umieszczoną w zbiorniku sztywno przytwierdzonym do powierzchni płyty (3) lub płytą o strukturze asfaltu zamocowanej w podobny sposób. Ugięcie promieniowe opony na stanowisku wymusza się przy pomocy siłownika hydraulicznego (6) lub śruby (7) służących do regulacji położenia ramy (2) względem płyty (3). Napęd koła zapewnia silnik hydrauliczny (4) zamontowany w osi koła (1), zaś swobodne toczenie jest możliwe, dzięki napędowi płyty (3) przy pomocy siłownika hydraulicznego (5). Długość płyty (3) dobrano w sposób umożliwiający badanie koła w warunkach quasi-statycznego obciążania, przy prędkościach napędu lub toczenia nieprzekraczających 1.2 m/s. Pracę koła przy różnych kątach znoszenia umożliwia siłownik (8) oraz obrotowa konsola (9). Opona koła ustawionego w kierunku ruchu płyty pracuje przy zerowej wartości kąta znoszenia, doznając jedynie deformacji w kierunku stycznym i promieniowym. Przy niezerowych kątach znoszenia podlega ona dodatkowo deformacji w kierunku poprzecznym.

Pomiar deformacji na przedstawionym stanowisku winien odbywać się z podziałem na trzy rejestrowane jednocześnie składowe deformacji: styczną, poprzeczną i promieniową (odpowiednio δx , δy , δz , rys. 1.). Przewidywany zakres pomiarowy przetwornika (tab. 1.) oszacowano na podstawie danych literaturowych [2, 12, 19] oraz katalogowych opon.



Rys. 1. Ilustracja założeń projektowych na tle koła jezdnego w stanie deformacji: x, y, z – układ odniesienia związany z obręczą koła, przyjęty do pomiarów odkształceń opony; $\delta x, \delta y, \delta z$ – styczna, poprzeczna i promieniowa składowa odkształcenia opony; A – usytuowanie zespołu mechanicznego dotykowego przetwornika deformacji opony



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego do identyfikacji parametrów statycznych i dynamicznych oponowych kół jezdnych; 1 – koło wyposażone w oponę badaną, 2 – rama, 3 – podłoże – płyta do pomiaru składowych siły reakcji, 4 – silnik napędzający koło badane, 5 – siłownik napędzający podłoże, 6, 7 – siłownik i śruba rzymska do wymuszania pionowej składowej deformacji, 8 – siłownik skrętu, 9 – konsola zapewniająca obrót koła w osi pionowej

Tabela 1. Przewidywany zakres zmienności poszczególnych składowych deformacji ogumienia (rys. 1., oszacowanie dla opon pojazdów osobowych i lekkich samochodów dostawczych na podstawie [2, 12, 19] i katalogów opon)

Składowa deformacji	Granica dolna	Granica górna	Amplituda
	[mm]		
Styczna (δx)	-8,0	+8,0	16,0
Poprzeczna (δy)	-36,0	+36,0	72,0
Promieniowa (δz)	-31,0	+5,5	36,5

Celem uniknięcia wpływu możliwie dużej liczby czynników zakłócających, np. podatności elementów konstrukcji stanowiska doświadczalnego, na wyniki pomiarów oraz zachowania możliwości pomiaru deformacji ogumienia współpracującego z podłożem podatnym, gabaryty i budowa przetwornika powinny umożliwiać jego montaż wewnątrz koła badanego (A, rys. 1.). Na wygodę montażu wpłynie opracowanie zwartego pakietu czujnikowego instalowanego wewnątrz koła w ograniczonej liczbie operacji. Koordynacja wyników pomiarów w dziedzinie położenia kąтового koła pozwoli na ich prezentację w postaci map deformacji, upraszczając ocenę ich poprawności, prowadzoną zarówno poprzez porównanie z rezultatami prezentowanymi w podobnej formie w literaturze [12, 19] jak i odniesienie do warunków pracy koła zasymulowanych na stanowisku. Korzystnym jest zatem, aby elementy pakietu czujnikowego przetwornika można było wykorzystać przynajmniej do wstępnej oceny położenia kąтового koła.

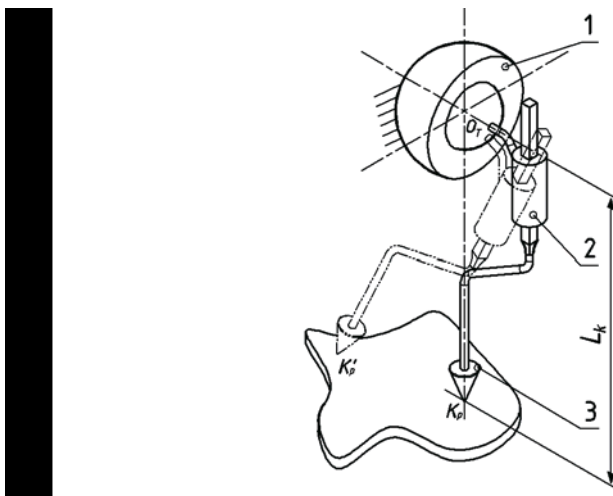
3. Przyjęty wariant rozwiązania, model teoretyczn

Na wstępie procesu projektowego na podstawie wad i zalet rozwiązań znanych ze stanu techniki sformułowano grupę konkurencyjnych idei przetwornika. Selekcji najkorzystniejszej dokonano, oceniając każdą w kryteriach m.in. zwartości budowy, przewidywanych parametrów metrologicznych, możliwości prowadzenia pomiarów zdalnych. Wobec trudności w jednoczesnym spełnieniu wszystkich kryteriów, za najlepszy kompromis uznano koncepcję mechanicznego przetwornika dotykowego, którego struktura dzieli się na trzy powiązane ze sobą obszary:

- konstrukcję mechaniczną,
- pakiet czujnikowy,
- model matematyczny z algorytmem przetwarzania sygnałów pomiarowych.

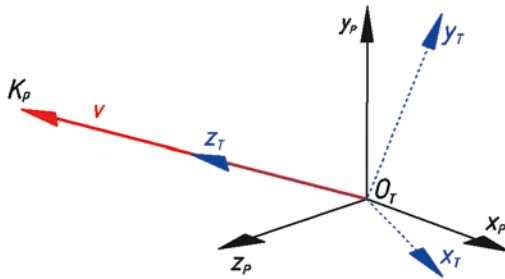
Podstawą konstrukcji mechanicznej jest mechanizm główny łączący wewnętrzną powierzchnię dna opony z obręczą koła. Dla zachowania zwartej budowy przetwornika oraz ograniczenia wpływu oporów ruchu w parach kinematycznych na sposób odkształcania opony, w procesie syntezy mechanizmu za najkorzystniejszy uznano wariant o minimalnej liczbie członów i par kinematycznych (rys. 3.). Ruch powierzchni opony względem obręczy koła odwzorowuje oparta w wybranym jej punkcie ($K_p \rightarrow K_p'$, rys. 3.) końcówka

pomiarowa (3, rys. 3.), co wobec trwałego zamocowania zespołu podstawy (1, rys. 3.) do obręczy, skutkuje zmianą konfiguracji mechanizmu. Ugięcie opony w kierunku promieniowym (δz) prowadzi do ruchu w parze postępowej łączącej trzpień pomiarowy (3, rys. 3.) z tuleją bazową (2, rys. 3.). Wystąpienie pozostałych składowych deformacji (δx , δy) skutkuje dodatkowo wychyleniem się trzpienia wraz z tuleją. Wartości przemieszczeń w parach kinematycznych definiują jednoznacznie położenie końcówki pomiarowej w układzie współrzędnych związanym z obręczą koła badanego. Elementy pakietu czujnikowego są źródłem sygnałów reprezentujących przemieszczenia w poszczególnych parach kinematycznych. Akwizycja sygnałów prowadzi do uzyskania danych wejściowych algorytmu obliczeniowego składowych deformacji opony.



Rys. 3. Schemat kinematyczny mechanizmu głównego przetwornika do pomiaru deformacji ogumienia:
 1 – zespół podstawy, 2 – człon pośredniczący (tuleja bazowa), 3 – trzpień z końcówką pomiarową

Podstawę algorytmu stanowi model matematyczny, w którym mechanizm główny (rys. 3.) reprezentuje wektor ν (rys. 4.) o początku w punkcie przegubowego zawieszenia tulei bazowej w zespole podstawy i końcu skojarzonym z końcówką pomiarową (odpowiednio O_T i K_p , rys. 3.). Z racji przegubowego zawieszenia tulei bazowej wektor ν ma możliwość swobodnego obracania się względem układu współrzędnych x_p, y_p, z_p związanego z zespołem podstawy. Wobec ruchliwości końcówki pomiarowej względem tulei bazowej, długość wektora ν jest zmienna. Wprowadzając do modelu dodatkowy układ współrzędnych x_T, y_T, z_T obracający się wraz z wektorem ν , a więc trwale związany z tuleją bazową, zagadnienie określenia współrzędnych końcówki pomiarowej względem zespołu podstawy rozdzielono na dwa etapy.

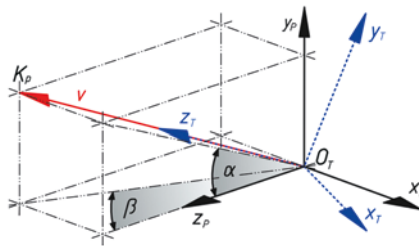


Rys. 4. Model mechanizmu przetwornika do pomiaru deformacji ogumienia: v - wirujący wektor o zmiennej długości reprezentujący me-CHANIZM przetwornika; x_p, y_p, z_p - układ odniesienia trwale związany z tuleją bazową; x_T, y_T, z_T - układ odniesienia trwale związany z zespołem podstawy i obręczą koła

Etap pierwszy stanowi określenie współrzędnych wektora T_v (1), wektora v w układzie indeksowanym literą T , co ogranicza się to do znalezienia odległości dzielącej końcówkę pomiarową i środek obrotu tulei bazowej względem zespołu podstawy (L_k , rys. 3).

$${}^T v = [0 \quad 0 \quad L_k] \tag{1}$$

Etap drugi zmierza do określenia wzajemnej orientacji kątowej tulei bazowej i zespołu podstawy, a więc układów współrzędnych indeksowanych literami T i P . W opisie orientacji zaproponowano wykorzystanie jednej z dwóch omówionych dalej notacji, co prowadzi do uzyskania dwóch alternatywnych opisów wektorowego modelu przetwornika.



Rys. 5. Reprezentacja orientacji wektora v w stosunku do nieruchomego układu współrzędnych x_p, y_p, z_p (związanego z zespołem podstawy) przy użyciu kątów α i β pomiędzy rzutami tego wektora na płaszczyzny, odpowiednio, y_p, z_p i x_p, z_p , a osią z_p

W notacji pierwszej (rys. 5.) orientację tulei bazowej względem zespołu podstawy opisują dwa kąty α i β wyznaczone osią z_p oraz rzutami wektora v na płaszczyzny y_p, z_p oraz x_p, z_p . Z perspektywy mechanizmu są to kąty obrotu tulei bazowej względem osi x_p i y_p . Współrzędne końcówki pomiarowej w układzie związanym z zespołem podstawy ${}^P v$ (2) uzyskuje się przez transformację wektora T_v (1) do układu indeksowanego literą P zgodnie z zależnościami (3, 4, 5).

$${}^P \mathbf{v} = [v_x \quad v_y \quad v_z] \tag{2}$$

$$v_x = L_k \operatorname{tg} \alpha \sqrt{\frac{1}{1+\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta}} \tag{3}$$

$$v_y = L_k \operatorname{tg} \beta \sqrt{\frac{1}{1+\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta}} \tag{4}$$

$$v_z = L_k \sqrt{\frac{1}{1+\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta}} \tag{5}$$

Notacja druga zakłada opis przy pomocy kwaternionów jednostkowych. Kwaternionem nazywa się liczbę zespoloną \mathbf{q} należąca do przestrzeni czterowymiarowej, jednoznacznie opisaną czterema parametrami (6).

$$\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4] \tag{6}$$

Parametr q_1 stanowi część rzeczywistą, natomiast pozostałe części urojone kwaternionu. Analogicznie do zbioru dwuparametrowych liczb zespolonych, definiuje się pojęcie kwaternionu sprzężonego $\bar{\mathbf{q}}$ zgodne z zależnością (7).

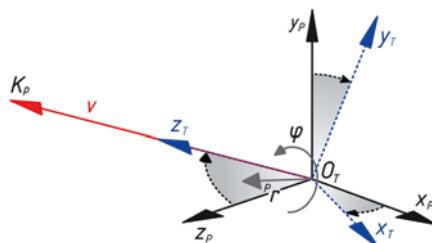
$$\bar{\mathbf{q}} = [q_1 \quad -q_2 \quad -q_3 \quad -q_4] \tag{7}$$

Kwaternionem jednostkowym nazywa się kwaternion, którego norma wyznaczona wg zależności (8) równa jest 1.

$$\|\mathbf{q}\| = \sqrt{q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2} \tag{8}$$

Podstawy teoretyczne kwaternionów oraz definicje operacji matematycznych w tej przestrzeni szerzej opisano m.in. w pozycjach [3, 6, 10, 14, 20].

Zastosowanie kwaternionów jednostkowych do reprezentacji wzajemnej orientacji dwóch układów współrzędnych prezentuje przykład (rys. 6.). Jeżeli kwaternion jednostkowy ${}^P_T \mathbf{q}$ opisuje orientację układu współrzędnych indeksowanego literą T w odniesieniu do układu P , każdy z czterech jego parametrów jest funkcją kąta φ i współrzędnych wektora jednostkowego ${}^P \mathbf{r}$ (9), wokół którego w pojedynczej operacji należy obrócić układ P o kąt φ , skutkiem czego osie x_P, y_P, z_P pokryją się odpowiednio z osiami x_T, y_T, z_T (10). Wektor ${}^P \mathbf{r}$ opisany jest współrzędnymi w układzie P .



Rys. 6. Reprezentacja orientacji przy pomocy kwaternionów jednostkowych: φ – wartość kąta obrotu układ odniesienia P wokół wektora jednostkowego ${}^P \mathbf{r}$ skutkującego pokryciem się osi układów współrzędnych P i T , za [20]

$$\underset{P}{\mathbb{H}}\mathbf{r} = [r_x \quad r_y \quad r_z] \tag{9}$$

$$\underset{T}{P}\mathbf{q} = \left[\cos \frac{\varphi}{2} \quad \underset{P}{\mathbb{H}}\mathbf{r} \sin \frac{\varphi}{2} \right] = \left[\cos \frac{\varphi}{2} \quad r_x \sin \frac{\varphi}{2} \quad r_y \sin \frac{\varphi}{2} \quad r_z \sin \frac{\varphi}{2} \right] \tag{10}$$

Zależność odwrotną, czyli orientację układu P względem T , opisuje kwaternion $\underset{T}{P}\mathbf{q}$ będący kwaternionem sprzężonym z $\underset{T}{P}\mathbf{q}$ (11).

$$\underset{T}{P}\mathbf{q} = \underset{T}{P}\bar{\mathbf{q}} \tag{11}$$

Zależność (11) wobec (7) można interpretować następująco. Jeśli pokrycie się osi układów P i T wystąpi po obrocie układu P wokół wektora ${}^P\mathbf{r}$ o kąt φ , to identyczny efekt przyniesie obrócenie układu T względem wektora ${}^P\mathbf{r}$ w kierunku przeciwnym, a więc o kąt $-\varphi$. Funkcja sinus jest funkcją nieparzystą, skąd parametry urojone kwaternionu $\underset{T}{P}\mathbf{q}$ przyjmują wartości przeciwne do $\underset{T}{P}\bar{\mathbf{q}}$.

Korzystając z notacji kwaternionów jednostkowych, transformację wektora ${}^T\mathbf{v}$ (1) do układu współrzędnych zespołu podstawy przeprowadzić można bezpośrednio w przestrzeni kwaternionów poprzez wykonanie dwóch operacji mnożenia (12). Operację mnożenia w przestrzeni kwaternionów przykładowo ilustruje zależność (13), zaś warunkiem jej przeprowadzenia jest przeniesienie trójwymiarowych wektorów ${}^T\mathbf{v}$ i ${}^P\mathbf{v}$ do przestrzeni kwaternionów (14, 15).

$$\underset{P}{\mathbb{H}}\mathbf{q}_v = \underset{T}{P}\mathbf{q} \otimes \underset{T}{\mathbb{H}}\mathbf{q}_v \otimes \underset{T}{P}\bar{\mathbf{q}} \tag{12}$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{a} \otimes \mathbf{b} = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4] \otimes [b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4] = \begin{bmatrix} a_1b_1 - a_2b_2 - a_3b_3 - a_4b_4 \\ a_1b_2 + a_2b_1 + a_3b_4 - a_4b_3 \\ a_1b_3 - a_2b_4 + a_3b_1 + a_4b_2 \\ a_1b_4 + a_2b_2 - a_3b_3 + a_4b_1 \end{bmatrix}^T \tag{13}$$

$$\underset{T}{\mathbb{H}}\mathbf{q}_v = [0 \quad \underset{T}{\mathbb{H}}\mathbf{v}] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad L_k] \tag{14}$$

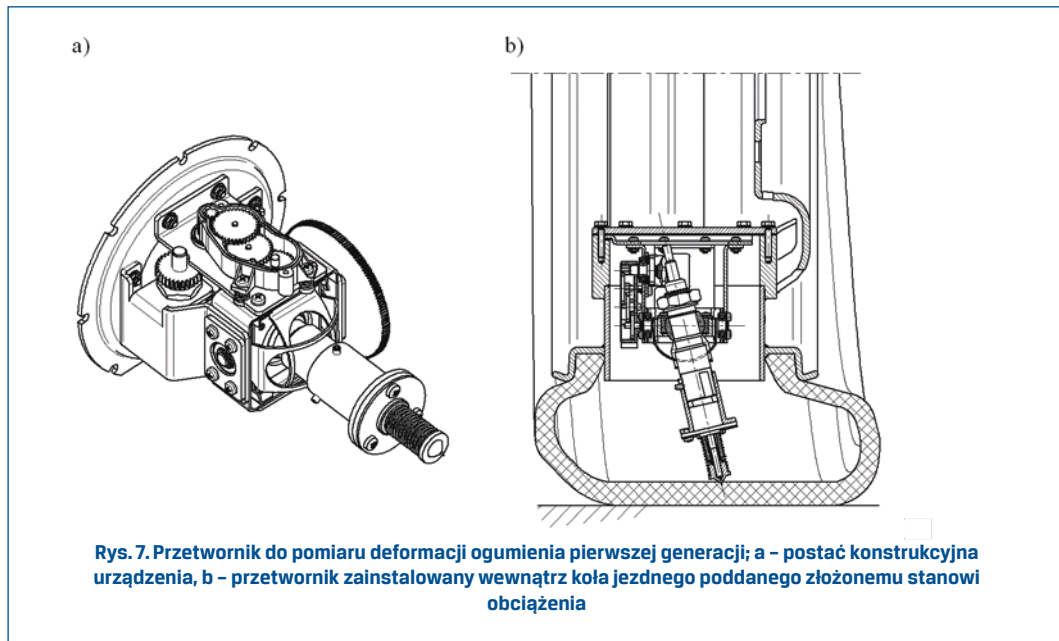
$$\underset{P}{\mathbb{H}}\mathbf{q}_v = [0 \quad \underset{P}{\mathbb{H}}\mathbf{v}] = [0 \quad v_x \quad v_y \quad v_z] \tag{15}$$

4. Koncepcje realizacji idei mechanicznego dotykowego przetwornika deformacji ogumienia

W oparciu o model teoretyczny zaproponowano realizację dwóch generacji mechanicznego dotykowego przetwornika do pomiaru deformacji ogumienia. W obydwu przypadkach przetwornik (rys. 7a., 10.) wprowadzany jest w całości do wnętrza koła przez hermetycznie zamykaną śluzę przygotowaną w obręczy (rys. 7b., 10., 11.). W kanale śluzы osadzany jest zespół podstawy stanowiący jedyny element bezpośrednio połączony z obręczą, dzięki czemu liczba operacji zmierzających do instalacji przetwornika wewnątrz koła jest ograniczona. W przypadku każdej z generacji konstrukcja mechaniczna stanowi nośnik dla odmiennego zestawu czujników. W ramach każdej z nich opracowano odmienną postać konstrukcyjną mechanizmu głównego i wykorzystano inny wariant opisu matematycznego.

Przetwornik generacji pierwszej

Przetwornik generacji pierwszej (rys. 7.) realizuje model matematyczny zilustrowany na rys. 5.

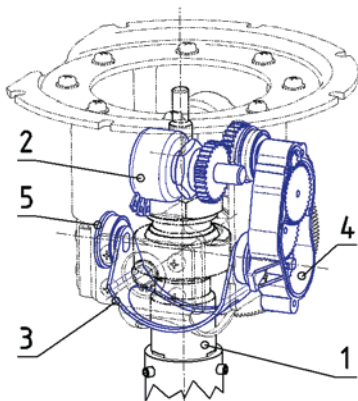


Wartość parametru L_k reprezentuje sygnał potencjometrycznego czujnika położenia liniowego z wysuwym trzpieniem. Czujnik ten, celem redukcji wymiarów przetwornika, zintegrowano z mechanizmem głównym. Pełni on tym samym rolę jedynej pary kinematycznej zapewniającej ruchliwość końcówki pomiarowej wzdłuż osi trzpienia pomiarowego. Końcówka pomiarowa, celem zapobieżenia jej przemieszczaniu po powierzchni opony w trakcie pomiarów, ma postać ostro zakończzonego stożka dociśniętego siłą sprężyny do powierzchni opony (rys. 7.) lub, w innym wariantcie, miniaturowej kuli współpracującej z półkulistą panewką przytwierdzoną w wybranym punkcie dna opony [7]. Obudowa potencjometru zawieszona jest w łożysku przegubowym osadzonego w zespole podstawy. Mocowanie obudowy do pierścienia wewnętrznego łożyska odbywa się przez tuleję bazową oraz głowicę montażową, co pozwala korygować położenie obudowy potencjometru względem środka obrotu łożyska, dając możliwość adaptacji przetwornika do badania ogumienia o zróżnicowanej wysokości profilu. Po osiągnięciu właściwego położenia głowicę montażową blokuje się względem tulei bazowej przy użyciu wkrętów dociskowych.

Za pomiar kątów α , β odpowiada para osadzonych w podstawie potencjometrycznych przetworników kąta wraz z elementami mechanizmów przetwarzających wychylenie tulei bazowej (1, rys. 8.) na ruch obrotowy wałków potencjometrów (2, rys. 8.). Kluczową rolę w przenoszeniu momentu obrotowego z tulei bazowej na wałek przetwornika kąta pełni ramię podparte obrotowo w zespole podstawy. Oś obrotu ramienia przechodzi przez środek

obrotu pierścienia wewnętrznego łożyska przegubowego, w którym osadzona jest tuleja bazowa. Sprzężenie ruchu tulei i ramienia odbywa się na zasadzie pary kinematycznej typu jarzmo-suwak, co pozwala na odwzorowanie przez ramię ruchu rzutu tulei bazowej na płaszczyznę normalną do osi obrotu ramienia. Obrót ramienia przenoszony jest na wałek czujnika położenia kąтового przez wielostopniową przekładnię multiplikującą.

Algorytm fuzji danych pomiarowych wg zależności (3, 4, 5) oraz kalkulacje poszczególnych składowych deformacji przewiduje się realizować na komputerze po uprzedniej akwizycji próbek sygnałów, np. z pomocą laboratoryjnego wzmacniacza pomiarowego (rys. 12.).



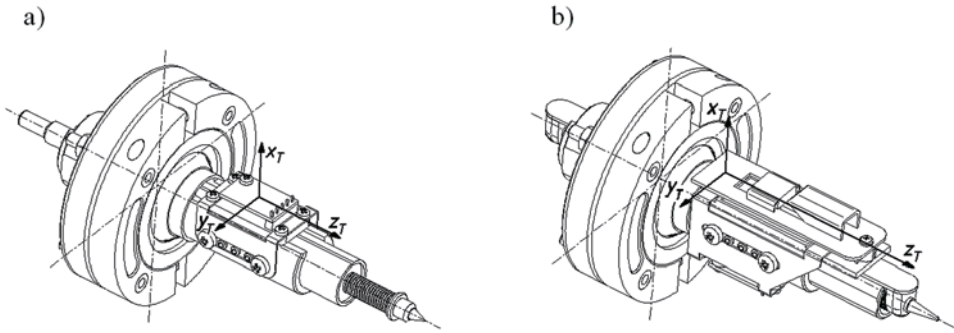
Rys. 8. Przetwornik do pomiaru deformacji ogumienia pierwszej generacji; rozmieszczenie elementów mechanizmu przenoszącego moment obrotowy z tulei bazowej (1) na czujnik położenia kąтового (2) służący do pomiaru wychylenia tulei bazowej względem osi stycznej do obwodu koła jezdnego (x_p); ramię (3) podparte obrotowo w łożyskach (5) przenosi moment na wałek przetwornika kąta (2) za pośrednictwem przekładni wielostopniowej (4)

Przetwornik generacji drugiej

Przetwornik drugiej generacji (rys. 9.) realizuje model matematyczny objaśniony na podstawie rys. 6. Modułowa budowa przetwornika ułatwia wymianę elementów jego pakietu czujnikowego w przypadku uszkodzenia któregoś z nich lub pojawienia się na rynku elementów czujnikowych o lepszych parametrach metrologicznych.

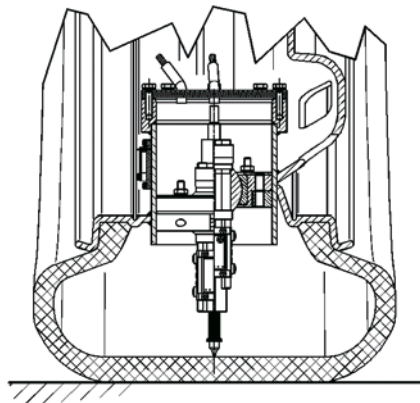
Kształt i wymiary zespołu podstawy, łożyska przegubowego i tulei bazowej dobrano w sposób umożliwiający stosowanie różnorodnych czujników do pomiaru położenia końcówki pomiarowej względem tulei bazowej. Wariantowość przewidziano już na etapie projektowania. Alternatywę wobec potencjometrycznego czujnika położenia (rys. 9a.) stanowić może indukcyjnościowy czujnik transformatorowy (LVDT) lub autorskiej konstrukcji moduł z optycznym enkoderem przemieszczenia (rys. 9b.).

Konstrukcja zespołu podstawy przetwornika drugiej generacji została zmodyfikowana do postaci dwudzielnej, co otwiera możliwość wyboru bazy pomiarowej (rys. 10.).



Rys. 9. Postaci konstrukcyjne drugiej generacji przetwornika do pomiaru deformacji ogumienia; a - wariant z potencjometrycznym czujnikiem przemieszczenia, b - wariant z optycznym enkoderm przemieszczenia

W początkowej fazie montażu przetwornika wewnątrz koła w wybranym położeniu względem śluzu ustala się mocowanie bazujące unieruchamiane siłą tarcia pomiędzy ściankami śluzu i rozpieranymi pomiędzy nimi elementami mocującymi. Następnie do mocowania przytwierdzana jest oprawa łożyska przegubowego z pozostałymi elementami przetwornika, w tym osadzoną w łożysku tuleją bazową, wokół której skupione są elementy pakietu czujnikowego.



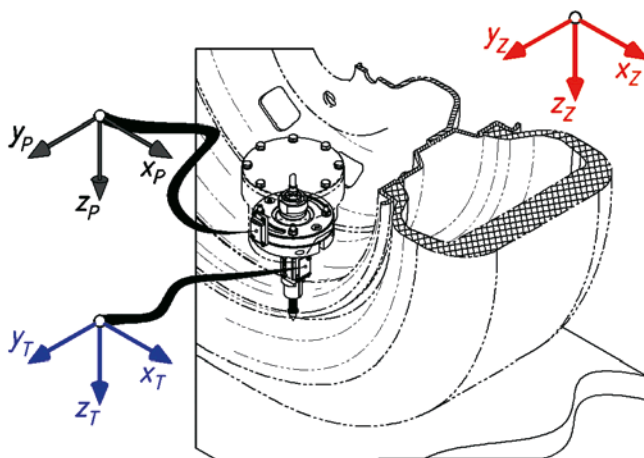
Rys. 10. Ilustracja możliwości regulacji położenia bazy pomiarowej drugiej generacji przetwornika do pomiaru deformacji ogumienia

Szacowanie parametrów kwaternionu jednostkowego reprezentującego wzajemną orientację tulei bazowej i zespołu podstawy odbywa się bezdotykowo z użyciem pary pracujących synchronicznie modułów nawigacji bezwładnościowej (AHRS – ang. *Attitude and Heading Reference System*). Dotychczas moduły tego typu znalazły zastosowanie, m.in. w:

- lotnictwie, w układach stabilizacji lotu i poziomowania bezzałogowych statków powietrznych [1] oraz podwodnych [13],
- biometrii behawioralnej organizmów żywych, w tym ludzi [21],
- analizie ruchu robotów przemysłowych prowadzonej celem oceny przydatności czujników inercyjnych w budowie torów sprzężenia zwrotnego układów ich sterowania [17].

Typowy moduł AHRS składa się z modułu czujników inercyjnych (IMU – ang. *Inertial Measurement Unit*) oraz jednostki obliczeniowej. W szczególnym przypadku moduł IMU stanowi triada trójosiowych czujników: żyroskop, akcelerometr i magnetometr. Wartości reprezentujące poziomy sygnałów pochodzących z czujników stanowią dane dla jednostki obliczeniowej, która w myśl zaprogramowanego algorytmu estymuje na ich podstawie parametry opisujące aktualną orientację układu współrzędnych związanego z osiami czułości czujników względem układu związanego z wektorami ziemskiego pola grawitacyjnego i magnetycznego. Algorytmy opracowane z myślą estymacji parametrów reprezentujących orientację w notacji kwaternionów są przedmiotem m.in. opracowań [1, 11, 15, 16, 18, 20].

W realiach przetwornika deformacji ogumienia drugiej generacji przyjęto moduły IMU rozmieszczone jak na rys. 11., spośród których każdy złożony jest z czujników wykonanych w technologii MEMS. Czujniki IMU związanego z zespołem podstawy stanowią źródło informacji o aktualnej orientacji obręczy koła (x_p, y_p, z_p) względem układu odniesienia związanego z wektorami ziemskiego pola grawitacyjnego i magnetycznego (x_z, y_z, z_z) opisanej kwaternionem $\hat{p}q$. Szacowanie kwaternionu $\hat{t}q$ opisującego orientację tulei bazowej (x_t, y_t, z_t) w tym samym układzie odniesienia odbywa się natomiast na podstawie wskazań czujników modułu zainstalowanego na powierzchni tulei. Oba moduły IMU powiązane są przez wspólną jednostkę obliczeniową w postaci mikrokontrolera, która próbując cyklicznie sygnały ze wszystkich czujników, uzyskuje dane umożliwiające szacowanie parametrów



Rys. 11. Rozmieszczenie modułów IMU wykorzystywanych w realiach dotykowego przetwornika deformacji ogumienia drugiej generacji do wyznaczenia parametrów kwaternionu jednostkowego opisującego wzajemną orientację tulei bazowej i zespołu podstawy

kwaternionu T_pq (11) opisującego wzajemną orientację zespołu podstawy i tulei bazowej. Szacowanie wspomnianych parametrów odbywa się przez obliczenie iloczynu (16).

$${}^T_pq = {}^Z_pq \otimes {}^T_zq \quad (16)$$

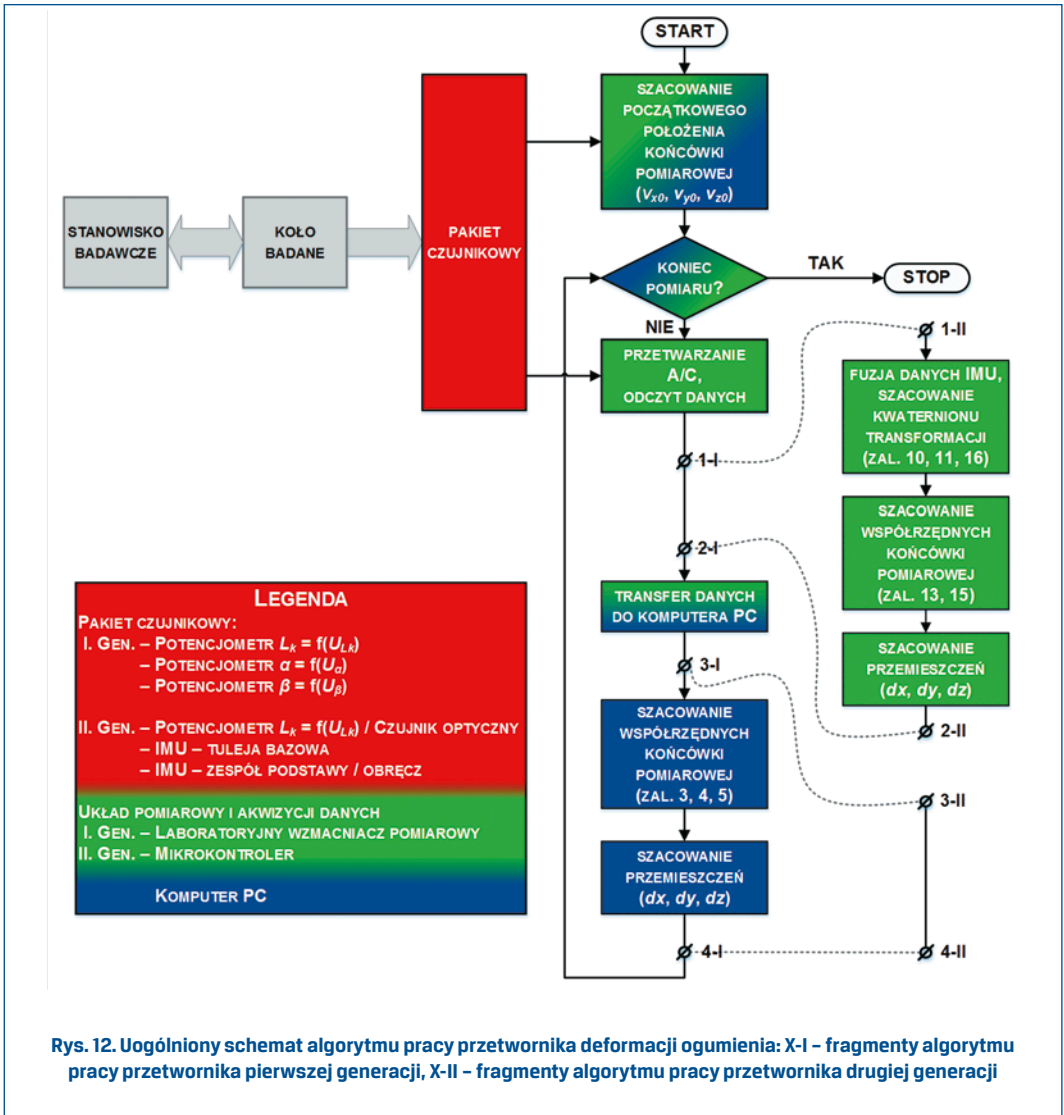
Szacowane cyklicznie parametry kwaternionu jednostkowego T_zq mogą posłużyć również do orientacyjnego określenia położenia kąтового koła w trakcie eksperymentu.

Na rys. 12. przedstawiono schemat blokowy konfrontujący algorytmy pracy przetworników deformacji ogumienia obydwu generacji. W przypadku przetwornika generacji drugiej zaprezentowano algorytm przetwornika, którego jednostka obliczeniowa koordynuje nie tylko pracę modułów IMU, ale również cyklicznie próbuje sygnał z czujnika położenia liniowego. Dysponuje ona zatem pełnym zestawem danych wymaganych do obliczenia położenia i przemieszczenia końcówki pomiarowej w układzie współrzędnych związanym z obręczą koła, co eliminuje konieczność obróbki danych pomiarowych na kolejnych stopniach przetwarzania (porównaj 3-I - 4-I z 3-II - 4-II, rys. 12.).

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcje dwóch generacji przetworników do pomiaru deformacji ogumienia, których nowatorstwo na tle stanu techniki aktualnego w chwili wystąpienia do prac projektowych [9] stało się podstawą do wystąpienia o nadanie prawa ochrony patentowej [7, 8].

Opracowana koncepcja przetwornika spełnia założenia omówione w początkowej części artykułu, co czyni ją przydatną w badaniach ogumienia prowadzonych na stanowisku laboratoryjnym. Pierwsze z zaproponowanych rozwiązań odznacza się wyjątkowo przejrzystym algorytmem fuzji danych pomiarowych, zaś drugie, bardziej skomplikowane od strony algorytmicznej, wyróżnia uproszczona konstrukcja mechaniczna. Modułowa budowa obydwu umożliwia ich rozwój w dłuższym horyzoncie czasowym. Doskonalenie przetworników może odbywać się drogą wymiany elementów pakietu czujnikowego w miarę pojawiania się czujników o lepszych parametrach metrologicznych lub, w przypadku urządzenia drugiej generacji, przez doskonalenie oprogramowania realizującego fuzję danych pomiarowych, np.: testowanie skuteczności różnorodnych algorytmów szacowania parametrów opisujących orientację tulei bazowej i podstawy przetwornika, zmianę sposobu całkowania wykorzystywanego w tych algorytmach, dążenie do skrócenia listy instrukcji programu zarządzającego pracą przetwornika, a w konsekwencji maksymalizację częstotliwości wykonania kolejnych jego iteracji [20]. Modułowa budowa przetwornika sprawia, iż niewielka modyfikacja jego konstrukcji pozwala na adaptację do prowadzenia pomiarów deformacji innych, podobnych do koła jezdnego struktur.



Rys. 12. Uogólniony schemat algorytmu pracy przetwornika deformacji ogumienia: X-I – fragmenty algorytmu pracy przetwornika pierwszej generacji, X-II – fragmenty algorytmu pracy przetwornika drugiej generacji

Ze względu na gabaryty i masę zaprezentowanego urządzenia jego adaptacja do pracy w typowych warunkach eksploatacji pojazdu samochodowego wydaje się trudna. Wyważenie dynamiczne koła jezdnych wymagałoby zastosowania przeciwwagi skupionej po stronie obręczy przeciwnej do punktu mocowania czujnika o masie przewyższającej masę typowych ciężarków do wyważania kół jezdnych. Badanie in situ z wykorzystaniem zaproponowanego rozwiązania proponuje się więc prowadzić przy niskich prędkościach ruchu, np. dla wolnobieżnych pojazdów przemysłowych, w których przypadku nie stosuje się wyważania dynamicznego kół. W najdalszej perspektywie przetwornik w myśl przedstawionej koncepcji stanowić może jednak punkt wyjścia w budowie analogicznego

urządzenia o bardziej zredukowanych wymiarach geometrycznych i masie, korzystnie realizującego pomiar metodą bezdotykową, tj. cechach umożliwiającymi jego mało inwazyjną aplikację w pojazdach dostępnych komercyjnie celem bieżącego monitorowania stanu technicznego ogumienia, stanu nawierzchni drogi lub wspomaganie pracy układów bezpieczeństwa instalowanych w pojazdach, np. ABS czy kontroli trakcji.

Literatura

- [1] Adiprawita, W., Ahmad, A.s. and Sembiring, J.: *Development of AHRS (Attitude and Heading Reference System) for Autonomous UAV (Unmanned Aerial Vehicle)*. International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Bandung, Indonesia, 17 – 19 June 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007, pp. 714 – 717.
- [2] Andrzejewski, R.: *Dynamika pneumatycznego koła jezdneho*. WNT. Warszawa 2010.
- [3] Bekir, E.: *Introduction to Modern Navigation Systems*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore 2007.
- [4] Chołodowski, J.: *Opracowanie metody pomiaru deformacji opony w procesie jej interakcji z dowolnym podłożem*, praca dyplomowa inżynierska, promotor: prof. dr hab. inż. Piotr Dudziński, prof. zw. PWr. Politechnika Wroclawska. Wrocław 2013.
- [5] Chołodowski, J.: *Projekt przetwornika nowej generacji do pomiaru deformacji opony*, praca dyplomowa magisterska, promotor: prof. dr hab. inż. Piotr Dudziński, prof. zw. PWr. Politechnika Wroclawska. Wrocław 2014.
- [6] Diebel, J.: *Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors*, Stanford University, Stanford 2006.
- [7] Dudziński, P., Chołodowski, J.: *Czujnik do pomiaru przemieszczeń, zwłaszcza elementów ogumienia względem obręczy koła jezdneho*, zgłoszenie patentowe: P.409800. Warszawa 2014.
- [8] Dudziński, P., Chołodowski, J.: *Czujnik do pomiaru przemieszczeń, zwłaszcza elementów ogumienia względem obręczy koła jezdneho*, zgłoszenie patentowe: P.409801. Warszawa 2014.
- [9] Chołodowski, J., Dudziński, P.: *Innowacyjna metoda identyfikacji eksperymentalnej deformacji opon pojazdów. Część 1: Systematyka metod pomiaru deformacji opon*. Archiwum Motoryzacji, vol. 67, 1/2015.
- [10] Farrell, J.A.: *Aided navigation, GPS with High Rate Sensors*. The McGraw-Hill Companies. USA 2008, Appendix D, pp. 501 – 513.
- [11] Fresk, E.: *Quaternion based Extended Kalman Filter as an Attitude and Heading Reference System*. Lulea University of Technology. Lulea, Szwecja 2012. [12] GREEN, R.W.: *A Non-contact Method for Sensing Tire Contact Patch Deformation Using a Monocular Vision System and Speckled Image Tracking*, master's thesis. Auburn, USA 2011.
- [13] Kim, H.s., Choi, H.s., Yoon, J.s. and Ro, P.i.: *Study on AHRS Sensor for Unmanned Underwater Vehicle*. International Journal of Ocean System Engineering, Korean Society of Ocean Engineers, 3, 1, 2011, pp. 165-170.
- [14] Kuipers, J.B.: *Quaternions and rotation sequences. Geometry, Integrability and Quantization*, Varna, Bulgaria, 1 – 10 September 1999. Coral Press, Sofia 2000, pp. 127 – 143.
- [15] Madgwick, S.o.h., Harrison, A.j.l. and Vaidyanathan, R.: *Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm*. 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics Rehab Week Zurich, Zurich, Switzerland, 29 June – 1 July 2011. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
- [16] Martin, P. and Salaun, E.: *Generalized Multiplicative Extended Kalman Filter for Aided Attitude and Heading Reference System*. 2010 AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Toronto, Ontario, Canada, 2 – 5 August 2010. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston 2010.
- [17] Roan, P., Deshpande, N., Wang, Y. and Pitzer, B.: *Manipulator State Estimation with Low Cost Accelerometers and Gyroscopes*. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Algarve, Portugal, 7 – 12 October 2012. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012, pp. 4822 – 4827.
- [18] Sun, G., Yong, L., Xie, J., Garratt, M. and Wang, C.: *Implementing quaternion based AHRS on a MEMS multisensor hardware platform*. IGSSS Symposium 2013, Outrigger Gold Coast, Qld Australia, 16 – 18 July 2013. International

Global Navigation Satellite Systems Society, Tweed Heads 2013.

- [19] Tuononen, A.: *Optical position detection to measure tire carcass deflections and implementation for vehicle state estimation*, doctoral dissertation. Helsinki University of Technology, TKK Dissertations 205. Espoo 2009.
- [20] Madgwick, S.O.H.: *An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays*: April 2010, on-line: http://sharenet-wii-motiontrac.googlecode.com/files/An_efficient_orientation_filter_for_inertial_and_inertialmagnetic_sensor_arrays.pdf, accessed: 23.03.2014.
- [21] Sun, M., Cao, X., Song, M., Izadi, S., Benko, H., Guimbretiere, F., Ren, X. and Hinckley, K.: *Enhancing Naturalness of Pen-and-Tablet Drawing through Context Sensing*. on-line: http://research.microsoft.com/en-us/people/xiangc/its2011_pentabletcontext.pdf, accessed: 06.01.2014.