

Stabilograficzne stanowisko do badania niemowląt

Streszczenie. Standardowe badanie stabilograficzne wspomaga diagnostykę ośrodkowego układu nerwowego. Dlatego może być również wykorzystane do wykrywania zaburzeń neurorozwojowych niemowląt. W artykule przedstawiono prototypową platformę stabilograficzną przeznaczoną do badań urodzonych przed terminem niemowląt. Omówiono w nim również metody parametryzacji trajektorii posturograficznych uzyskanych podczas badań.

Abstract. The standard posturographic examination supports the diagnosis of the central nervous system. Therefore, it can also be used to detect infants with neurodevelopmental impairments. The article presents a prototype force plate designed for the premature babies examinations. The parameterization methods of the posturographic trajectories obtained during the tests are also discussed. (*Posturography stand for infant assessments*).

Słowa kluczowe: stabilografia, platforma stabilograficzna, parametryzacja trajektorii stabilograficznych, zaburzenia neurorozwojowe.

Keywords: posturography, force plate, posturographic trajectories parameterization, neurodevelopmental impairment.

Wstęp

Podczas tradycyjnego testu stabilografii statycznej pacjent stoi na platformie i jego zadaniem jest minimalizowanie odchylenia swego ciała od pozycji pionowej. Platforma stabilograficzna umożliwia rejestrację punktu przyłożenia wypadkowej siły nacisku jego stóp (Center of Pressure - COP) w czasie na ogół 30 sekund. W wyniku tej rejestracji otrzymuje się trajektorię punktu COP zwaną trajektorią stabilograficzną, która następnie poddawana jest parametryzacji [1]. Otrzymane parametry pozwalają na ocenę stanu układu utrzymywania równowagi [2,3]. W jego skład wchodzi między innymi trzy podstawowe układy czuciowe: wzrokowy, przedśionkowy oraz somatosensoryczny (proprioceptywny i skórny), centralny układ nerwowy oraz układ szkieletowo-mięśniowy [4]. Badanie stabilograficzne może być więc użytecznym narzędziem do oceny i wykrywania zmian chorobowych układu równowagi lub jego podukładów. Między innymi wykorzystywane jest w diagnostyce niektórych chorób centralnego układu nerwowego, na przykład choroby Parkinsona [5,6].

Z drugiej strony nowonarodzony człowiek w pierwszym okresie swego życia intensywnie rozwija swój centralny układ nerwowy, a w szczególności sieć połączeń między neuronami. Niemowlę, wykonując z pozoru przypadkowe ruchy rękami i nogami, tworzy nowe połączenia w swojej sieci neuronowej - wzorce późniejszych skoordynowanych ruchów układu szkieletowo-mięśniowego. Obserwując te ruchy lekarz może ocenić czy dziecko rozwija się prawidłowo pod tym względem, czy też nie. Powstało przynajmniej kilka skal oceny prawidłowości rozwoju mózgu dziecka, między innymi: General Movements Assessment (GMA) oraz Alberta Infant Motor Scale (AIMS) [7]. Są to jednak oceny subiektywne, które lekarz podejmuje na podstawie kilkuminutowej obserwacji dziecka.

Do bardziej obiektywnej oceny ruchów niemowląt nadawałaby się doskonale platforma stabilograficzna. Każdy ruch dziecka zmienia położenie punktu COP jego ciała na platformie, a zarejestrowana podczas badania trajektoria poddana parametryzacji mogłaby dostarczyć lekarzom bardziej obiektywnych miar użytecznych w diagnostyce neurorozwojowej dziecka. Ma to szczególne znaczenie zwłaszcza w przypadku dzieci urodzonych przedwcześnie (tak zwanych wcześniaków), bo to w ich przypadku najczęściej występują problemy rozwojowe, na przykład porażenie mózgowe (celebral palsy). Wczesne wykrycie tych problemów jest szczególnie istotne podczas terapii.

Od ponad dziesięciu lat podejmowane są próby wykorzystania stabilografii do oceny rozwoju centralnego układu nerwowego niemowląt. Z uwagi jednak na brak dedykowanych platform do tego celu, lekarze wykorzystują najczęściej maty barorezystywne do rejestracji ruchów dziecka [8,9]. Maty takie o odpowiednio dużych rozmiarach i wymaganej rozdzielczości są jednak drogie.

Z inspiracji lekarzy Śląskiej Akademii Medycznej w Katowicach zaprojektowano i wykonano prototyp stanowiska stabilograficznego do badania niemowląt. Istotnym założeniem projektowym tego stanowiska było to, że powinno ono być stosunkowo niedrogi oraz żeby swymi wymiarami platforma była zbliżona do zwykłego przewijaka dla dzieci. W związku z tym zamiast maty barorezystywnej zdecydowano się wykorzystać tensometryczne przetworniki siły podpierające w czterech narożnikach sztywnej płytę górną. Istotną kwestią była także możliwość rejestracji filmu podczas badania stabilograficznego. Ma to umożliwić wzrokową ocenę stanu dziecka zgodnie z tradycyjną skalą GMA w celu porównania tej oceny z parametrami trajektorii.

W dalszej części artykułu przedstawiono budowę stanowiska zarówno od strony mechanicznej jak i elektronicznej, a następnie omówiono podstawowe metody parametryzacji trajektorii zaimplementowane w oprogramowaniu stanowiska. Na koniec przedyskutowano istotną kwestię rozdzielczości pomiaru położenia punktu COP na płaszczyźnie platformy.

Stabilograficzne stanowisko do badania niemowląt

Stanowisko składa się z platformy stabilograficznej z przymocowanym do niej statywem umożliwiającym montaż kamery na wysokości 1 metr nad nią oraz komputera typu Laptop z zainstalowanym dedykowanym oprogramowaniem (rys. 1). Górna, sztywna płyta platformy ma wymiary 60cmx100cm i jest podparta na czterech mostkach tensometrycznych typu S o wysokości 50mm niemieckiej firmy MEGATRON (KM500). Dolna część platformy stanowi sztywną konstrukcję i jest wyposażona w cztery regulowane nóżki umożliwiające kompensację nierówności podłoża, co zapobiega pojawieniu się dodatkowych naprężeń górnej płyty.

Do budowy platformy wykorzystano przetworniki tensometryczne o zakresie pomiarowym 50N (ok 5kG). Dzięki temu uzyskano dużą rozdzielczość pomiaru punktu COP trajektorii, a przy tym badania dzieci o podwyższonej masie nie doprowadzą do uszkodzenia przetworników (oprócz ciężaru dziecka, przetworniki obciąża także sztywna płyta górną). Stała przetwarzania

(charakterystyczna) przetworników wynosi 2mV/V. Tolerancja liniowości tego typu przetwornika jest mniejsza od 0,05% zakresu pomiarowego, a maksymalna histereza wynosi 0,1% zakresu pomiarowego.



Rys.1. Stabilograficzne stanowisko do badania niemowląt

Czterokanałowy tor pomiarowy wykonano w oparciu o mikrokontroler ADuCM360 firmy Analog Devices dedykowany do obsługi przetworników pomiarowych przeznaczonych do pracy w środowisku przemysłowym. Zawiera on w sobie rdzeń mikroprocesora ARM Cortex-M3 oraz między innymi dwa 24-bitowe przetworniki AC typu Sigma-Delta. Ponadto wyposażony jest w 12-kanałowy multiplexer analogowy, programowalny wzmacniacz o wzmacnieniu od 1 do 128 oraz sprzętowy filtr cyfrowy. W zaprojektowanej platformie wykorzystano gotowy zestaw uruchomieniowy dla mikrokontrolerów ADuCM360 typu ADuCino360. Umożliwia on programowanie oraz transmisję danych za pośrednictwem interfejsu USB. Zestaw ten jest zasilany poprzez ten sam port USB. ADuCino360 w znacznym stopniu uprościło realizację części elektronicznej platformy stabilograficznej.

Maksymalna częstotliwość widma sygnału stabilograficznego nie przekracza 20Hz [10]. Dlatego przyjęto częstotliwość próbkowania sygnału z czterech przetworników tensometrycznych równą 75Hz, a górną

częstotliwość graniczną filtru cyfrowego ustalono na 20Hz. Sygnał analogowy przetwarzany jest na postać cyfrową i przesyłany do komputera w sposób ciągły. Dzięki temu zdarzenia generowane przez system operacyjny komputera nie mają wpływu na ciągłość pracy przetwornika.

Maksymalną 24-bitową rozdzielczość przetwornika Sigma-Delta można uzyskać tylko w pewnych szczególnych warunkach i w praktyce jest ona na ogół mniejsza. Po zmontowaniu części elektronicznej platformy dokonano pomiaru rzeczywistej rozdzielczości pomiaru napięcia i wyniosła ona 16-bitów.

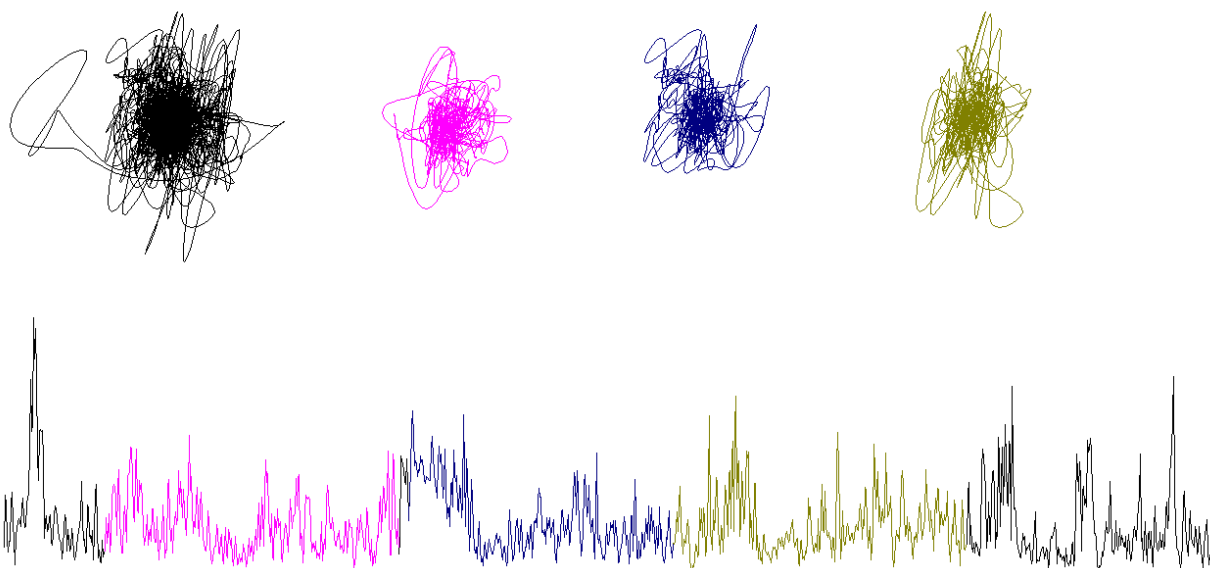
Parametryzacja trajektorii stabilograficznej

Przyjęto, że zawsze po uruchomieniu dedykowanego programu stanowiska stabilograficznego (przed uruchomieniem pierwszego badania) przeprowadzany jest proces tarowania platformy stabilograficznej. Ma to na celu uwzględnienie ewentualnych zmian wstępnych naprężeń przetworników tensometrycznych. W momencie rozpoczęcia badania program automatycznie inicjuje zapis video z kamery, a na ekranie komputera oprócz okna kamery video lekarz może obserwować bieżące zmiany położenia punktu COP ciała dziecka. Na rysunku 2 przedstawiono przykładową trajektorię uzyskaną w czasie dwuminutowego badania (skrajnie lewa trajektoria) wraz z trzema jej wybranymi trzydziestosekundowymi fragmentami oraz (u dołu rysunku) przebieg funkcji wychYLENIA punktu COP od środka trajektorii w czasie 2 minut.

Współrzędne i -tego punktu trajektorii $T_C(i)=[X_C(i), Y_C(i)]$ wyznaczone są na podstawie odczytanych z przetworników sił nacisku w danej chwili oraz współrzędnych (względem środka platformy) punktów podparcia płyty górnej przez przetworniki [11].

$$(1) \quad X_C = \frac{\sum_{j=1}^4 P_j x_j}{\sum_{j=1}^4 P_j} \quad Y_C = \frac{\sum_{j=1}^4 P_j y_j}{\sum_{j=1}^4 P_j}$$

gdzie: P_j – siła nacisku wywierana na j -ty przetwornik, x_j, y_j – współrzędne j -tego przetwornika względem geometrycznego środka platformy.



Rys.2. Przykładowa 2-minutowa trajektoria wraz z jej trzema fragmentami oraz (poniżej) funkcja wychYLENIA punktu COP od środka trajektorii

Po zakończeniu badania wyznaczany jest geometryczny środek trajektorii $T_{c0}=[X_{c0}, Y_{c0}]$ oraz obliczane są wartości podstawowych parametrów trajektorii [10-12]:

- Długość trajektorii LT

$$(2) \quad LT = \sum_{i=2}^N l(i)$$

gdzie:

$$(3) \quad l(i) = \sqrt{[x_c(i) - x_c(i-1)]^2 + [y_c(i) - y_c(i-1)]^2}$$

- Pole powierzchni pod rozwiniętą trajektorią AT

$$(4) \quad AT = \sum_{i=2}^N p(i)$$

gdzie:

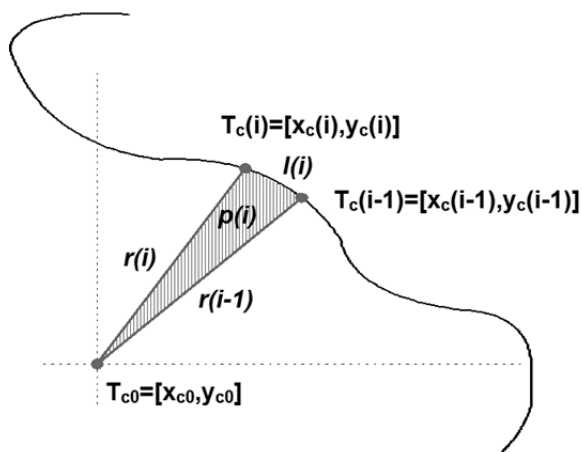
$$p(i) = \sqrt{ob(i) \cdot [ob(i) - r(i-1)] \cdot [ob(i) - r(i)] \cdot [ob(i) - l(i)]}$$

jest polem powierzchni trójkąta utworzonego przez dwa kolejne punkty trajektorii $[T_c(i-1)]$ oraz $T_c(i)$ i punkt środka trajektorii T_{c0} (rys. 3); $l(i)$ zdefiniowane jest równaniem (3) a pozostałe wielkości wynoszą

$$(5) \quad r(i) = \sqrt{[x_c(i) - X_{c0}]^2 + [y_c(i) - Y_{c0}]^2}$$

$$r(i-1) = \sqrt{[x_c(i-1) - X_{c0}]^2 + [y_c(i-1) - Y_{c0}]^2}$$

$$ob(i) = \frac{l(i) + r(i) + r(i-1)}{2}$$



Rys.3. Sposób obliczania pola powierzchni pod rozwiniętą trajektorią

- Wychylenie średnie trajektorii DT

$$(6) \quad DT = \sum_{i=1}^N r(i)$$

gdzie N jest ilością punktów trajektorii a $r(i)$ dane jest wzorem (5).

- Współczynnik zmienności prędkości trajektorii VVT

$$(7) \quad VVT = \frac{\sqrt{\frac{(N-1) \cdot \sum_{i=2}^N l^2(i) - \left[\sum_{i=2}^N l(i) \right]^2}{(N-1) \cdot (N-2)}}}{\frac{\sum_{i=2}^N l(i)}{N-1}} \cdot 100\%$$

gdzie N jest liczbą punktów trajektorii a $l(i)$ dane jest wzorem (3).

Rozdzielczość pomiaru współrzędnych punktu COP trajektorii stabilograficznej

Wartość wychylenia punktu COP od środka trajektorii nie zależy od masy ciała dziecka. Jednak biorąc pod uwagę sposób obliczania współrzędnych punktu COP (równanie 1) należy stwierdzić, że ciężar ciała dziecka będzie miał zasadniczy wpływ na rozdzielczość pomiaru położenia punktu COP na płaszczyźnie platformy [11,13].

Ze względu na stosunkowo duży ciężar sztywnej płyty górnej platformy (około 4kG) nie udało się w pełni wykorzystać nominalnego zakresu napięć wejściowych przetwornika AC. Obciążając poszczególne przetworniki odważnikami wzorcowymi zmierzono rzeczywistą rozdzielczość (podziałkę) pomiaru ciężaru czterech kanałów pomiarowych i okazało się, że jest ona nie gorsza od $d = 0,5G$.

Rozdzielczość pomiaru współrzędnych punktu COP trajektorii oszacowano zakładając, że w stanie początkowym masa wzorcowa znajduje się w centralnym punkcie platformy i jej ciężar rozkłada się równomiernie na wszystkie cztery przetworniki. Wtedy współrzędna $Y_c(0)$ punktu COP będzie równa zero:

$$(8) \quad Y_c(0) = \frac{\sum_{j=1}^4 P y_j}{4P} = \frac{\alpha d (y_p + y_p - y_p - y_p)}{4\alpha d} = 0$$

gdzie: P – ¼ siły nacisku masy wzorcowej, α – cyfrowa reprezentacja siły P , $d = 0.5G$ – podziałka pomiaru ciężaru (zmiana siły działającej na przetwornik potrzebna do zmiany jej reprezentacji o jeden bit), $y_p = 450\text{mm}$ – bezwzględna odległość zamocowania przetwornika od osi X układu współrzędnych platformy.

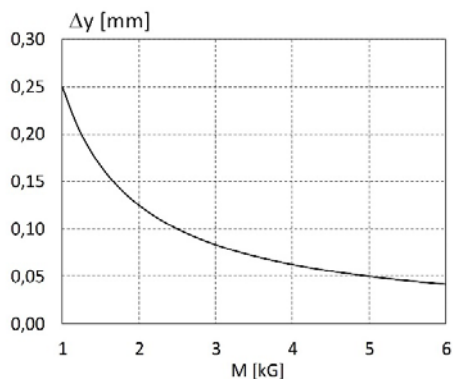
Następnie założono, że nastąpiło zwiększenie siły działającej na jeden wybrany przetwornik (na przykład pierwszy) o wartość równą podziałce pomiaru ciężaru $d = 0.5G$. Wtedy współrzędna $Y_c(1)$ punktu COP będzie równa

$$(9) \quad Y_c(1) = \frac{(\alpha + 1)d + \alpha d - \alpha d - \alpha d}{(\alpha + 1)d + \alpha d + \alpha d + \alpha d} y_p$$

Zatem rozdzielczość Δy pomiaru współrzędnej Y_c punktu COP wyniesie:

$$(10) \quad \Delta y = Y_c(1) - Y_c(0) = \frac{d}{4P + d} y_p = \frac{1}{1 + \frac{M}{d}} y_p$$

gdzie: $M = 4P$ – ciężar badanego dziecka
Z równania (10) wynika, że rozdzielczość pomiaru współrzędnych punktu COP pogarsza się liniowo wraz ze zwiększeniem odległości zamocowania przetworników od środka platformy. Zależy ona jednak także od ciężaru badanego dziecka. Im jego ciężar jest mniejszy tym gorsza rozdzielczość. Na rysunku 4 przedstawiono graficznie zależność rozdzielczości pomiaru współrzędnej Y_c punktu COP w funkcji ciężaru badanego dziecka. Dla dzieci o wadze powyżej 2,5kG rozdzielczość Δy jest nie gorsza niż 0,1mm. Z uwagi na to, że bezwzględna odległość zamocowania przetworników od osi Y układu współrzędnych platformy x_p jest o połowę mniejsza od y_p , precyzja pomiaru współrzędnej X_c punktu COP jest dwukrotnie większa.



Rys.4. Zależność rozdzielenności pomiaru współrzędnej y_c punktu COP od ciężaru dziecka

Wnioski

W pracy przedstawiono istotne mechaniczne oraz elektroniczne aspekty prototypowego stabilograficznego stanowiska do badania niemowląt, które zostało zaprojektowane i wykonane w Katedrze Elektroniki, Elektrotechniki i Mikroelektroniki Politechniki Śląskiej. Omówiono w niej także dedykowany program komputerowy służący do rejestracji trajektorii stabilograficznych oraz ich parametryzacji. Wskazano także w jaki sposób rozdzielczość pomiaru współrzędnych punktu COP trajektorii zależy od ciężaru badanego dziecka.

Zaprojektowana platforma stabilograficzna, wykorzystująca cztery przetworniki tensometryczne jest konkurencyjnym rozwiązaniem w porównaniu z matą barorezystywną używaną do rejestrowania swobodnych ruchów położonych na platformie niemowląt.

Do tej pory przeprowadzono kilka pilotażowych badań dzieci przedwcześnie urodzonych. Po wykonaniu przynajmniej kilkudziesięciu badań będzie można stwierdzić, które z zaimplementowanych metod parametryzacji trajektorii najlepiej różnicują niemowlęta z zaburzeniami neurorozwojowymi od dzieci zdrowych. Mając taką bazę danych stabilograficznych będzie można także opracować nowe, bardziej efektywne sposoby parametryzacji sygnału stabilograficznego.

Niniejsza praca została sfinansowana ze środków na badania statutowe MNiE

Autor: dr inż. Zenon Kidoń, Politechnika Śląska, Katedra Elektroniki, Elektrotechniki i Mikroelektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: Zenon.Kidoni@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Winter D.A., Human balance and posture control during standing and walking, *Gait & Posture*, 3 (1995), n.4, 193-214
- [2] Duarte M., Freitas S.M.S.F., Revision of posturography based on force plate for balance evaluation, *Rev Bras Fisioter*, 14 (2010), n.3, 183-192
- [3] Chaudhry H., Bukiet B., Ji Z., Findley T., Measurement of balance in computer posturography. Comparison of methods - A brief review, *Journal of Bodywork & Movement Therapies*, 15 (2011), n.4, 82-91
- [4] Peterka R.J., Sensorimotor integration in human postural control, *J. Neurophysiol*, 88 (2002), 1097-1118
- [5] Błaszczyk J.W., Orawiec R., Duda-Kłodowska D., Opala G., Assessment of postural instability in patients with Parkinson's disease, *Experimental Brain Research*, 183 (2008), n.1, 107-114.
- [6] Johnson L., James I., Rodrigues J., Stell R., Thickbroom G., Mastaglia F., Clinical and Posturographic Correlates of Falling in Parkinson's Disease, *Movement Disorders*, 28 (2013), n.9, 1250-1256
- [7] Bosanquet M., Copeland L., Ware R., Boyd R., "A systematic review of tests to predict cerebral palsy in young children," *Devel. Med. Child Neurology*, 55 (2013), n.5, 418-426
- [8] Dusing S.C., Kyvelidou A., Mercer V.S., Stergiou N., Infants born preterm exhibit different patterns of center-of-pressure movement than infants born at full term, *Physical therapy*, 89 (2009), n.12, 1354-1362
- [9] Dusing S.C., Izzo T.A., Thacker L.R., Galloway J.C., Postural complexity differs between infant born full term and preterm during the development of early behaviors, *Early human development*, 90 (2014) n.3, 149-156
- [10] Baratto L., Morasso P.G., Re C., Spada G., A new look at posturographic analysis in the clinical context: sway-density vs. other parameterization techniques, *Motor Control*, 6 (2002), n.3, 246-270
- [11] Łukaszewicz T., Kania D., Kidon Z., Pethe-Kania K., Posturographic methods for body posture symmetry assessment, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences - Technical Sciences*, 63 (2015), n.4, 907-917
- [12] Kidoń Z., Jerzy F., Ocena postępów rehabilitacji za pomocą testu stabilografii naddźwiękowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 9, 50-53
- [13] Łukaszewicz T., Kania D., Kidoń Z., Pethe-Kania K. (2019). Postural symmetry evaluation based on the analysis of temporary and average CoP displacements registered during the follow-up posturography, *IEEE Access*, 7 (2019), 26402-26410