

Autoreferat rozprawy doktorskiej
ODTWARZANIE STANU SYSTEMÓW DYNAMICZNYCH
Z DYSKRETNÝCH DANYCH POMIAROWYCH

mgr inż. Jerzy Baranowski

Promotor: prof. dr hab. inż. Wojciech Mitkowski

Kraków 2010

1 Wstęp

W pracy rozpatrywana jest problematyka odtwarzania ciągłego stanu systemu dynamicznego z dyskretnych danych pomiarowych. W celu przybliżenia problemu rozważmy następujący przykład. W technologii chemicznej często mamy do czynienia z produkcją dużych ilości substancji. Znane są parametry procesu, takie jak stężenia substratów, dostarczana energia, parametry mieszania i inne. Możemy przyjąć, że znamy ich wartości przez cały czas. Analiza powstającego produktu nie jest jednak rzeczą prostą. Jest ona zazwyczaj czasochłonna (trzeba dokonać analizy chemicznej) i wiąże się z pewnymi, często niebagatelnymi kosztami (odczynników, czasu pracy specjalistów). Praktyka i rachunek ekonomiczny wymuszają więc wykonywanie takiej analizy tylko co pewien czas (im rzadziej tym lepiej). Skład produktu jest jednak jedyną informacją o przebiegu procesu. To, że badamy go tylko w dyskretnych chwilach czasu, nie zmienia faktu, że wewnątrz linii produkcyjnej, bez jakichkolwiek pomiarów, przemiany chemiczne zachodzą w sposób ciągły, często gwałtowny. Stąd pojawia się konieczność odpowiedzi na pytanie - jak odtworzyć pełną informację o przebiegu procesu, przez cały czas jego trwania?

Przykłady gdzie pomiar jest dyskretny można mnożyć. W układach mechatronicznych bardzo często mamy do czynienia z dyskretnymi pomiarami pozycji (a prędkości zazwyczaj w ogóle nie mierzymy wprost). Jest to wywołane stosowaniem dyskretnych czujników (zob. np. Górecki, 1997) lub też wykorzystaniem systemów wizyjnych (zob. np. Papanikolopoulos, Khosla i Kanade, 1993). Szczególnie w tym ostatnim przypadku odstępy między pomiarami są wydłużane przez czas potrzebny na przetwarzanie obrazu. Oczywistym jest jednak, że dysponując pełną informacją o stanie systemu (prędkości i położenia) jesteśmy w stanie opracować dużo lepsze sterowanie.

Jeszcze inna klasa problemów, w których pomiary są z natury dyskretny to sytuacje, w których automatyka styka się z biologią, a w szczególności medycyną. Oczywistym jest, że pacjenta nie można badać w sposób ciągły. Jego krew można pobierać tylko w ograniczonych ilościach. Zdjęć rentgenowskich nie powinno się dokonywać częściej niż raz do roku. Podobnie ograniczony czasowo jest szereg innych badań (endoskopie, punkcje itp.), nie mówiąc już o ekonomicznych czynnikach przeprowadzania konkretnych elementów diagnostyki. W sytuacji gdy interesujący jest np. poziom cukru i insuliny we krwi pacjenta metody estymacji stanu okazują się nad wyraz pomocne (np. Chee i Fernando, 2007).

Dlatego też problematykę odtwarzania stanu systemów dynamicznych z dyskretnych danych pomiarowych można uznać za ważną zarówno poznawczo jak też i ze względu na potencjalne zastosowania. W tej pracy będziemy się skupiać na sytuacjach, gdy dyskretnego charakteru pomiarów nie można zaniedbać i do odtwarzania stanu konieczne jest uwzględnianie konkretnych czynników.

W skutek przeprowadzonych badań i analizy problemu w pracy można postawić następujące tezy.

Teza 1. Możliwe jest opracowanie metod odtwarzania ciągłego stanu z dyskretnych danych pomiarowych w liniowych oraz skończenie wymiarowych nieliniowych systemach dynamicznych.

Znajomość modelu matematycznego systemu dynamicznego liniowego lub nieliniowego pozwala na różne możliwości jego analizy. Wykorzystanie dostępnego w teorii sterowania aparatu matematycznego umożliwia skonstruowanie sposobów odtwarzania wartości stanu w konkretnych punktach, oraz przewidywanie na jej podstawie zachowania się układu w przyszłości. W oparciu o dostępną wiedzę można zaproponować algorytm postępowania pozwalający na cykliczne uzyskiwanie ciągłych estymat stanu na przedziałach pomiędzy pomiarami. Możliwe jest też konstruowanie obserwatorów stanu o działaniu asymptotycznym, dokładnym lub optymalnym w obecności zakłóceń. Co więcej, można proponować sposoby doboru takich chwil pomiaru, aby uzyskana z ich użyciem estymata stanu była optymalna. Dodatkowo, w układach nieliniowych osiągalne jest uzyskanie efektywnych metod numerycznych, pozwalających na rozwiązanie problemu odtwarzania stanu.

Teza 2. Z wykorzystaniem metod interpolacji i aproksymacji możliwe jest opracowanie efektywnych obliczeniowo algorytmów przybliżonego odtwarzania stanu

Dla układów ciągłych pojęcia estymacji są rozwijane od dawna i dysponując ciągłym wyjściem można uzyskać bardzo efektywne obserwatory. Istotnym jest więc poszukiwanie sposobów aproksymacji dyskretnego wyjścia funkcją ciągłą i wykorzystanie metodyki ciągłego odtwarzania stanu tak, aby uzyskać przybliżone metody odtwarzania stanu. Jest to ważne zwłaszcza dla układów nieliniowych, dla których bardzo trudno (lub jest to w ogóle niemożliwe) skonstruować dokładny model dyskretny systemu. Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest to, że ciągłe obserwatory stanu są łatwe w implementacji i strojeniu, co więcej, ta prostota pozwala na różnego rodzaju usprawnienia pracy algorytmów, jak np. obliczenia równoległe.

2 Odtwarzanie ciągłego stanu z dyskretnych danych pomiarowych

W ramach niniejszej pracy rozważane będą systemy dynamiczne opisane następującym równaniem różniczkowym

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (1)$$

przy czym

- $f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}^n$
- $x(t) \in \mathbb{R}^n$, będzie nazywane stanem,
- $u(t) \in \mathbb{R}^r$, będzie nazywane sterowaniem,
- $t \geq 0$
- $x(0) = x_0$
- $f(a, b)$ spełnia globalny warunek Lipschitza ze względu na pierwszy argument, t.j.

$$\begin{aligned} |f(x_1, b) - f(x_2, b)| &\leq L|x_1 - x_2| \\ \forall x_1, x_2 \in \mathbb{R}^n \quad \forall b \in \mathbb{R}^r \end{aligned} \quad (2)$$

ze stałą Lipschitza $L > 0$ i jest ciągła ze względu na obydwa argumenty.

Przyjmujemy, że wartości wyjścia znane są w dyskretnych chwilach czasu t_i , gdzie

$$t_i = t_{i-1} + h_i \quad (3)$$

$$t_0 \geq 0 \quad (4)$$

$$h_i > 0 \quad (5)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

przy czym

$$h_i \geq \tau_{max} \quad (7)$$

$$\tau_{max} = \max_i (t_{i+1} - t_i) < \infty \quad (8)$$

Pomiary mogą, ale nie muszą, być równoodległe. W takim przypadku mamy

$$h_i = h = \tau_{max} \quad \forall i \quad (9)$$

$$t_i = t_0 + ih \quad (10)$$

h będziemy nazywać okresem próbkowania (czasem lub krokiem dyskretyzacji). Tak określone wyjście systemu dynamicznego jest często spotykane w zastosowaniach. Można je interpretować jako sytuację, w której dostępna jest niepełna informacja o stanie systemu, co więcej, informacja ta dotyczy tylko konkretnych chwil czasu.

System dynamiczny (1) jest ciągły w czasie (opisany jest równaniem różniczkowym), zatem klasyczne metody odtwarzania ciągłego stanu z wyjścia systemu nie mogą zostać bezpośrednio zastosowane. Stwarza to konieczność opracowania metody odtwarzania ciągłego stanu w oparciu o dyskretne dane pomiarowe. W niniejszej pracy proponowany jest algorytm rozwiązujący ten problem. Rozważany algorytm składa się z dwóch cyklicznie powtarzających się etapów - predykcji i korekcji.

Algorytm 1. *Odtwarzanie ciągłego stanu z dyskretnych danych pomiarowych*

1. *START*

Ustalić $\hat{x}(t_0)$ jako początkową wartość estymaty, $i := 0$

2. *PREDYKCJA*

Rozwiązać równanie różniczkowe $\dot{\hat{x}}(t) = f(\hat{x}(t), u(t))$ (równanie systemu (1)) dla $t \in [t_i, t_{i+1}]$ z warunkiem początkowym $\hat{x}(t_i)$.

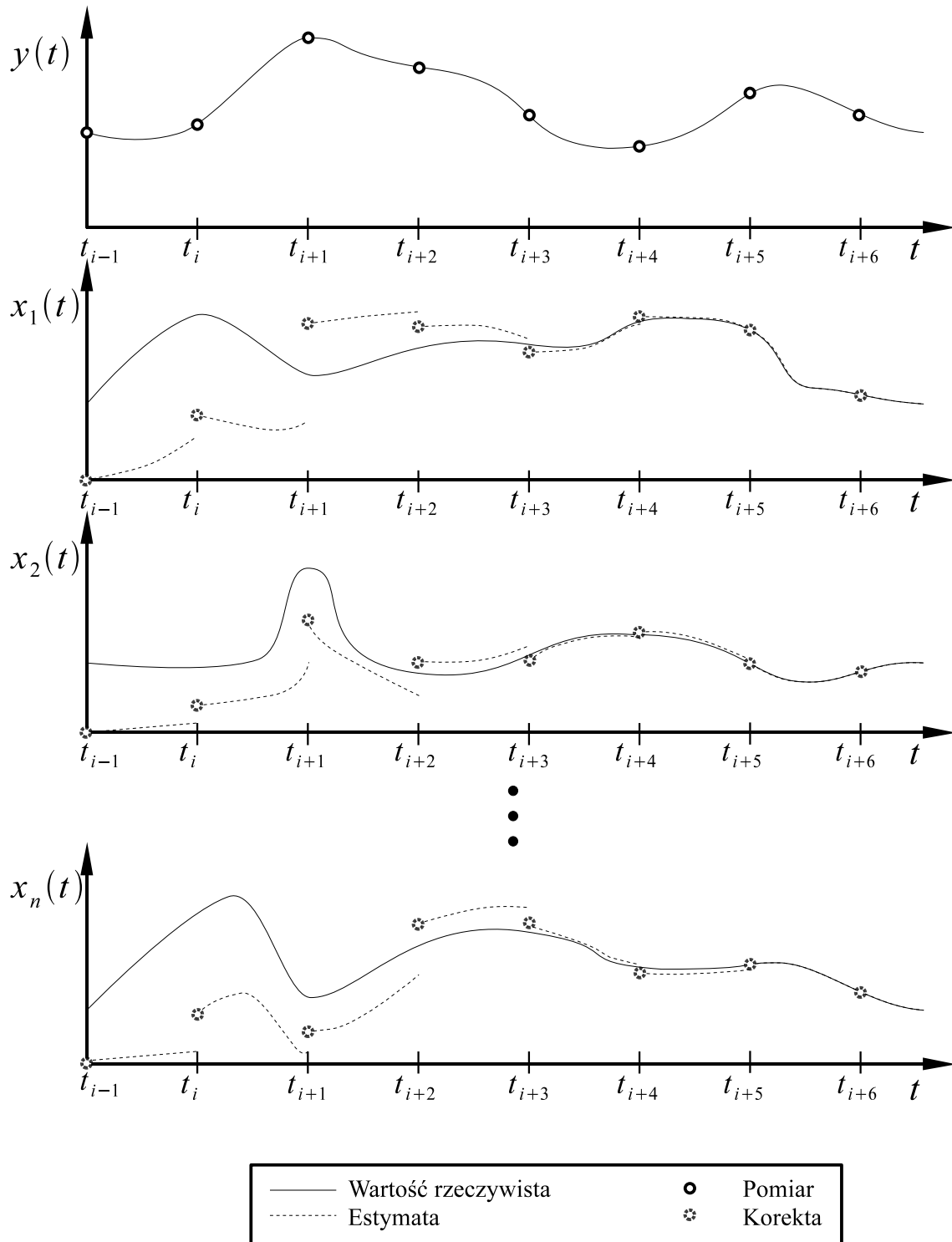
3. *KOREKCJA*

Za pomocą wartości $y(t_j)$ dla $j \leq i + 1$ ($j = i + 1, i, i - 1, \dots, 0$) oraz przebiegu $u(t)$ dla $t \leq t_{i+1}$ wyznaczyć estymatę $\hat{x}(t_{i+1})$.

4. $i := i + 1$, przejść do kroku 2.

Ideę algorytmu ilustruje rysunek 1. Ciągłe przebiegi zmiennych stanu oraz wyjścia na wykresach rysunku oznaczone są liniami ciągłymi. Pomiary wyjścia $y(t)$ systemu (1), przedstawionego na pierwszym wykresie rysunku, oznaczone okręgami o ciągłym brzegu, służą do wyznaczania estymat poszczególnych zmiennych stanu od x_1 do x_n w kolejnych chwilach czasu. Estymaty te, oznaczone okręgami o przerywanym brzegu, służą jako warunki początkowe dla przewidywanych w kroku predykcji ciągłych estymat stanu, oznaczonych linią przerywaną. Jak można zauważyć, w momencie pojawienia się nowego pomiaru wyjścia estymaty są aktualizowane (następuje korekcja), i w przebiegu estymaty obserwowany jest skok jej wartości. W ten oto sposób algorytm generuje przedziałami ciągłą estymatę stanu systemu (1). Warto zauważyć, że im bliżej trajektorii stanu znajduje się wartość estymaty, tym skoki są mniejsze, zaś estymata staje się coraz bliższa ciągłej. W sytuacji, gdy estymata będzie dokładnie równa wartości stanu, a wyjście systemu będzie niezakłócone, korekcja nie będzie już wносить zmian.

Omówmy teraz dokładniej poszczególne kroki algorytmu.



Rysunek 1: Objasnienie do algorytmu

2.1 Predykcja

Wiadomo, że dla systemów postaci (1), które spełniają warunek (2) (przynajmniej lokalnie), znając warunek początkowy $x(t_0)$ w chwili t_0 oraz przebieg sterowania $u(t)$ na odcinku czasu $[t_0, T]$, można jednoznacznie określić trajektorię systemu na tym samym odcinku czasu, przy czym, jeżeli warunek (2) jest spełniony globalnie (np. dla prawej strony (1) o ograniczonej pochodnej) T może być dowolnie duże (nazywane jest to nieograniczonym przedłużaniem rozwiązań). Wynika to wprost z twierdzenia o istnieniu i jednoznaczności

rozwiązania równania różniczkowego (zob. np. Kudrewicz, 1976, str. 47, Mitkowski, 2007, str. 191).

Analogicznie, znając wartość stanu $x(t_i)$ w chwili t_i oraz przebieg sterowania na odcinku $[t_i, T]$, można jednoznacznie uzyskać przy przyjętych założeniach trajektorię systemu na odcinku czasu $[t_i, T]$. Niech $T = t_{i+1}$ wtedy znając wartości stanu w chwilach t_i dla kolejnych wartości i , można sekwencyjnie przewidywać ciągle trajektorie stanu systemu dla $[t_i, t_{i+1}]$. Postępowanie takie nazywać będziemy **predykcją** (*ang. prediction*).

2.2 Korekcja

Na przykład, rozważmy chwilę t_{i+3} z rysunku 1. Dysponujemy dyskretnymi pomiarami wyjścia z chwil t_j , $j = 0, 1, \dots, i+3$, oraz przebiegiem sterowania na przedziale $t \in [t_0, t_{i+3}]$. Istnieje wiele metod estymacji stanu, które wykorzystują albo wszystkie te dane albo pewien ich podzbiór. Zależy to od wymagań na szybkość obliczeń, dokładność, oraz od tego, czy system jest liniowy czy nieliniowy. Przykładowo, dla systemów nieliniowych rzędu n o wyjściu skalarnym można sformułować tzw. hybrydowy obserwator Newtona, który do estymacji stanu będzie wykorzystywał pomiary $y(t_k)$ dla $k = i+4-n, i+4-n, \dots, i+2, i+3$ oraz $u(t)$ dla $t \in [t_{i+4-n}, i+3]$.

Oczywiście jest to tylko jeden z możliwych sposobów odtworzenia stanu. Poprzez pojęcie **korekcji** (*ang. correction*) będziemy rozumieć wykorzystanie dostępnej do chwili obecnej informacji na temat wyjścia i sterowania w celu odtworzenia wartości stanu systemu w tej chwili.

Algorytm 1 pod angielską nazwą *Continuous State Estimation from Discrete Output Measurements* lub skrótem CSEDOM wprowadzony został przez autora w pracy (Mitkowski i Baranowski, 2007) i był rozwijany później w pracach (Baranowski, 2008c; Baranowski i Tutaj, 2007, 2008b,a; Baranowski, 2007a,c,b,d; Baranowski i Mitkowski, 2008; Baranowski, 2008a,b; Baranowski i Mitkowski, 2009; Baranowski, 2009b,a).

W ramach pracy omówiono pewne ogólne własności algorytmu, pozwalające na jego formalną analizę oraz projektowanie metod predykcji i korekcji. W szczególności rozpatrzono:

- oszacowania błędu estymacji pomiędzy poszczególnymi pomiarami,
- definicje stabilności, globalnej atraktywności i globalnej asymptotycznej stabilności algorytmu 1 oraz procedur korekcji,
- związki pomiędzy wyżej wspomnianymi własnościami procedury korekcji a ich odpowiednikami dla całego algorytmu,
- definicję obserwowalności systemu ciągłego z dyskretnym wyjściem oraz jej związek z definicją obserwowalności dla systemów liniowych, stacjonarnych,
- zasadę rozdzielności (*ang. separation principle*) oraz jej związki ze stabilnością wejście-stan (*ang. input-to-state-stability*, zob. np. Sontag, 1995).

Osobny rozdział pracy poświęcono zagadnieniom predykcji wymagających szczególnej analizy. Konkretnie skupiono się na:

- numerycznym uzyskiwaniu ciągłych rozwiązań równań różniczkowych,
- szacowaniu błędów powstałych na skutek procesu predykcji, przy czym określono warunki dla układów liniowych, dla których predykcja nie generuje dodatkowych błędów,
- szacowaniu błędów predykcji wywołanych zakłóceniami wchodzącymi na system (tzw. zakłócenia wejścia, lub *ang. process noise*).

3 Metody korekcji

Większa część pracy poświęcona została różnym metodom korekcji - t.j. metodom odtwarzania stanu w konkretnej chwili czasu w oparciu o dyskretny pomiar wyjścia. Analizę metod korekcji podzielono na trzy obszary

- korekcję w układach liniowych,
- korekcję w układach nieliniowych,
- przybliżone metody korekcji

W ramach korekcji w układach liniowych rozważano m.in. algorytmy obserwatora dyskretno ciągłego, dyskretnego obserwatora dokładnego, obserwatora najmniejszych kwadratów. Jednym z ciekawszych omawianych zagadnień była obserwacja C^0 optymalna. Dla tej metody, opartej o zastosowania analizy funkcjonalnej opracowano metody efektywnego wyznaczania parametrów optymalnego obserwatora. W tym celu sformułowano specjalny ciąg problemów optymalizacji statycznej.

W ramach korekcji w układach nieliniowych również rozważano szereg metod odtwarzania stanu, m.in. nieliniowy obserwator dyskretno-ciągły, hybrydowy rozszerzony filtr Kalmana, hybrydowy obserwator Newtona oraz estymację z ruchomym horyzontem (MHE). Te dwie metody zastosowano w przykładach umieszczonych w dalszej części referatu. Koncepcja hybrydowego obserwatora Newtona bazuje na sprowadzeniu zadania odtwarzania stanu do rozwiązywania pewnego układu równań nieliniowych metodą Newtona. Metoda MHE opiera się natomiast na cyklicznej minimalizacji pewnego wskaźnika jakości określającego odległość estymaty od wartości prawdziwej.

Część poświęcona metodom przybliżonym korekcji analizuje pomysł aproksymacji dyskretnego wyjścia z układu za pomocą ciągłej funkcji czasu a następnie estymacji stanu za pomocą obserwatorów ciągłych. Rozważano metody klasyczne jak interpolacja wielomianowa i funkcjami sklejanymi oraz dwie metody opracowane przez autora: kolokacje wyjścia i adaptacyjne kolokacje wyjścia. Metody kolokacji opierają się na tym, aby wykorzystywać informacje na temat estymaty stanu do wyznaczania aproksymacji wyjścia. W ten sposób im bliższa prawdzie jest estymata stanu tym przybliżenie wyjścia jest dokładniejsze.

4 Przykłady

Przykład 1 (Odtwarzanie stanu układu z rzeczywistych pomiarów przy użyciu estymacji z ruchomym horyzontem (MHE)). Rozważany jest układ zbiorników wodnych znajdujący się w Katedrze Automatyki AGH przedstawiony na rysunku 2. Model matematyczny tego układu opisany jest równaniami

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{S_1} q(u) - \frac{1}{S_1} q_1(h_1) \quad (11)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{S_2(h_2)} q(u) - \frac{1}{S_2(h_2)} q_2(h_2) \quad (12)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{S_3(h_3)} q(u) - \frac{1}{S_3(h_3)} q_3(h_3) \quad (13)$$

gdzie h_i oznacza poziom cieczy w i -tym zbiorniku, zaś

$$S_1 = a d = \text{const}$$

$$S_2 = d \left(n + \frac{m-n}{c} h_2 \right)$$

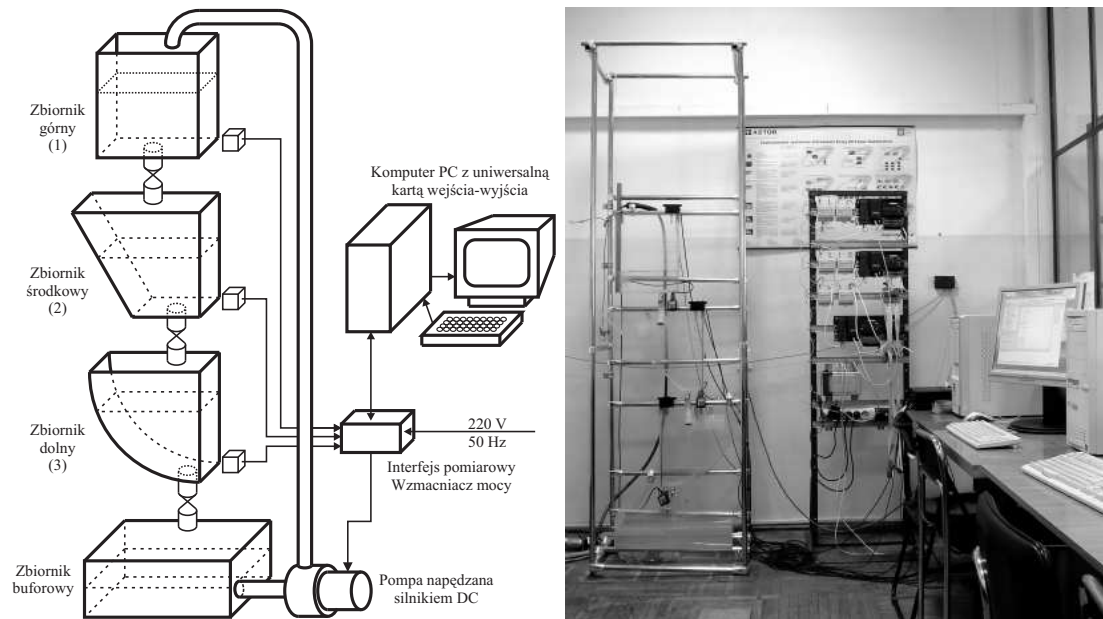
$$S_3 = d \sqrt{2 r h_3 - h_3^2}$$

oznaczają powierzchnie swobodne cieczy w zbiornikach. Wynikają one z kształtu poszczególnych zbiorników. Przepływy cieczy przez poszczególne zbiorniki charakteryzowane są przez

$$q_i(h_i) = C_i \sqrt{D_i + h_i}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (14)$$

Zaś dopływ wody do górnego zbiornika z pompy opisuje (dla $u \in [0, 1]$) wielomian piątego stopnia

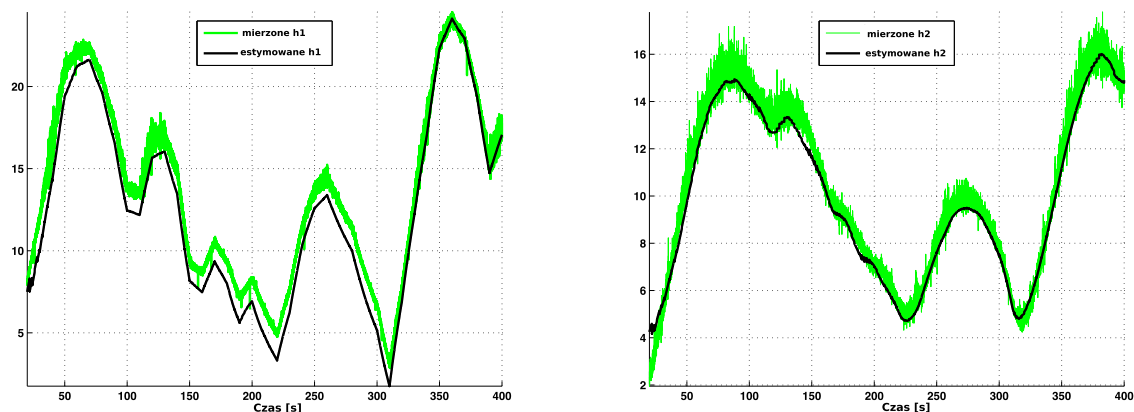
$$q(u) = w_5 u^5 + w_4 u^4 + w_3 u^3 + w_2 u^2 + w_1 u + w_0 \quad (15)$$



Rysunek 2: Schemat i zdjęcie stanowiska laboratoryjnego trzech zbiorników wodnych znajdującego się w Katedrze Automatyki AGH

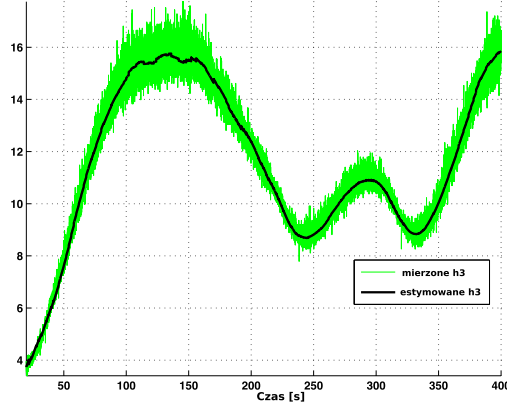
Jako cel postawiono estymację ciągłego stanu wysokości cieczy w zbiornikach górnym i środkowym w oparciu o pomiary wysokości cieczy w zbiorniku środkowym z okresem próbkowania równym 2s. W tym celu wykorzystano metodę estymacji z ruchomym horyzontem (MHE).

Wyniki eksperymentów można zaobserwować na rysunkach 3 i 4. Na rysunkach tych przedstawiono również pomiary uzyskane z czujników stanowiska, z większą częstotliwością próbkowania, aby lepiej oddać jakość ciągłej estymaty. Jak można zauważyć metoda MHE ma bardzo dobre własności filtrujące, odtwarzając stan bardzo dokładnie. Wyniki pochodzą z pracy (Baranowski i Tutaj, 2008b).



Rysunek 3: Estymata poziomu wody w górnym (z lewej) i środkowym (z prawej) zbiorniku uzyskana z MHE i wielkość mierzona - dane eksperymentalne

Przykład 2 (Zastosowanie hybrydowego obserwatora Newtona do estymacji stanu pacjenta oddziału intensywnej opieki medycznej (OIOM)). Jednym z bardziej istotnych problemów w oddziałach OIOM jest nadzorowanie poziomu glukozy we krwi pacjentów. Wiele przypadłości, takich jak zawał serca lub uszkodzenia wielonarządowe powoduje nagły skok poziomu cukru. Jest to bardzo niebezpieczne, ponieważ wiąże się to ze zwiększonym ryzykiem infekcji, zaburza krzepnięcie krwi oraz destabilizuje równowagę metaboliczną. Ba-



Rysunek 4: Estymata poziomu wody w dolnym zbiorniku uzyskana z MHE i wielkość mierzona - dane eksperymentalne

dania pokazały, że rygorystyczne kontrolowanie poziomu cukru we krwi znacząco zmniejsza śmiertelność pacjentów na oddziałach. Obecnie, w celu uniknięcia hiperglikemii, bazuje się na częstych pomiarach poziomu cukru połączonych z podawaniem insuliny, lub też stosuje się automatyczne pompy insulinowe. Dotyczy to nie tylko cukrzyków, ale też ludzi nie mających wcześniej historii problemów z metabolizmem cukru.

Oczywistym jest, że aby prawidłowo podawać insulinę należy wiedzieć jak najwięcej o stanie pacjenta. Ponieważ jedyną wielkością łatwą do zmierzenia jest poziom cukru we krwi, istotnym staje się estymowanie pozostałych informacji, najlepiej uzyskując ciągłą informację, tak jak to jest rozważane w niniejszej pracy.

Model dynamiki cukru we krwi pacjenta OIOM opisuje poniższy model (zob. Van Herpe, Espinoza, Haverbeke, De Moor i Van den Berghe, 2007)

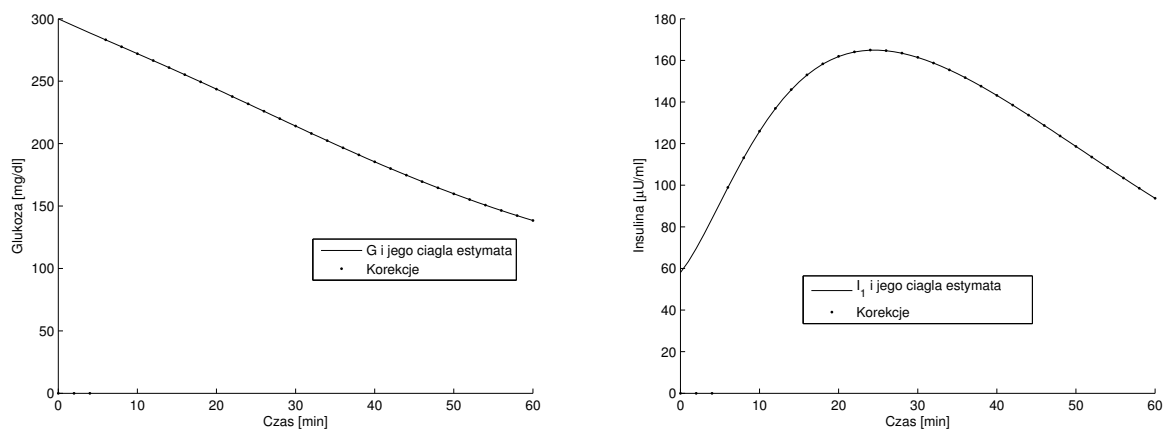
$$\begin{aligned}
 \dot{G}(t) &= (P_1 - X(t))G(t) - P_1G_b + \frac{F_G}{V_G} \\
 \dot{X}(t) &= P_2X(t) + P_3(I_1 - I_b) \\
 \dot{I}_1(t) &= \alpha \max(0, I_2) - n(I_1 - I_b) + \frac{F_I}{V_I} \\
 \dot{I}_2(t) &= \beta\gamma(G(t) - h) - nI_2(t)
 \end{aligned} \tag{16}$$

gdzie G i I_1 to odpowiednio zawartość cukru i insuliny we krwi. Zmienna X odpowiada za efektywność insuliny zaś zmienna I_2 nie ma bezpośredniej interpretacji klinicznej - wprowadzono ją po to, aby w pewien sposób symulować działanie trzustki u pacjenta nie będącego diabetykiem.

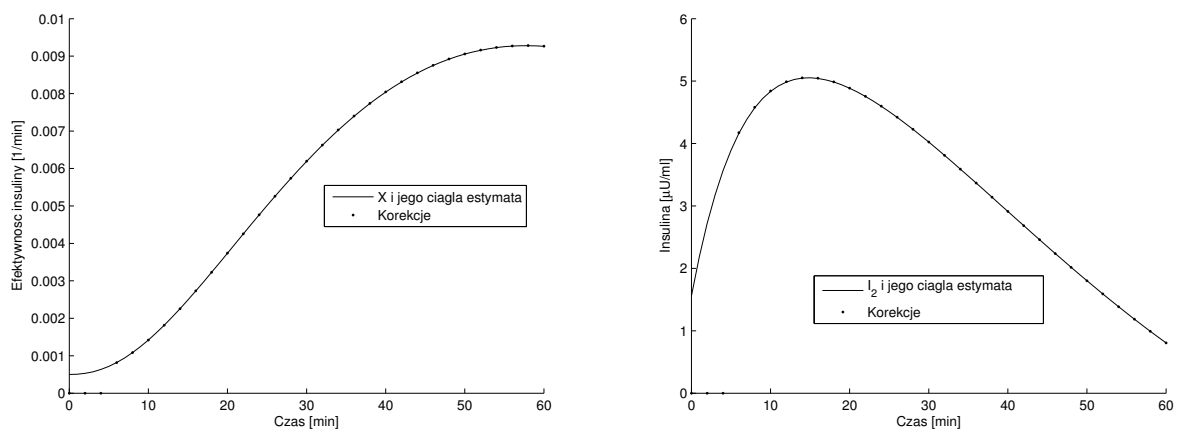
Do estymacji stanu modelu wykorzystano hybrydowy obserwator Newtona. Przyjęto, że pomiary glukozy dokonywane są co 15 minut, zaś system nie jest pobudzany z zewnątrz - nie ma dopływu ani insuliny ani glukozy. Przykład iteracji obserwatora Newtona ilustruje tabela 1, zaś wyniki symulacji przedstawione są na rysunkach 5 i 6, Jak można zauważyć, po uzyskaniu czterech pomiarów obserwator zaczął odtwarzać stan dokładnie. Zaprezentowane wyniki pochodzą z prac (Baranowski, 2009b; Baranowski i Mitkowski, 2009).

Tabela 1: Przykład iteracji hybrydowego obserwatora Newtona

x_0	w_0^1	w_0^2	w_0^3	w_0^4	w_0^5
300	200	300	300	300	300
0.0005	0.01	-0.0033	0.0004	0.0005	0.0005
58	56	-57.7166	60.617	58.0021	58
1.5600	-1.8966	20.6963	1.6996	1.5600	1.5600



Rysunek 5: Estymata poziomu glukozy (z lewej) i insuliny (z prawej) u pacjenta OIOM uzyskana za pomocą hybrydowego obserwatora Newtona



Rysunek 6: Estymata efektywności insuliny (z lewej) oraz zmiennej pomocniczej I_2 (z prawej) u pacjenta OIOM uzyskana za pomocą hybrydowego obserwatora Newtona

5 Podsumowanie

Rozprawa doktorska stanowi efekt pracy badawczej autora nad zagadnieniami odtwarzania ciągłego stanu systemów dynamicznych z dyskretnych danych pomiarowych. Niektóre rezultaty zawarte w rozprawie były przedstawiane przez autora na konferencjach naukowych bądź też publikowane w czasopismach naukowych (zob. np. prace Baranowski, 2008c; Baranowski i Tutaj, 2007, 2008b; Baranowski i Piątek, 2008; Baranowski i Tutaj, 2008a; Baranowski, 2007a,c, 2008a,b, 2007b,d; Mitkowski i Baranowski, 2007; Baranowski i Mitkowski, 2008, 2009; Baranowski, 2009b,a) Znaczna część tych wyników została rozszerzona i uzupełniona w niniejszej pracy. Według autora najważniejsze oryginalne wyniki pracy to:

- Opracowanie ogólnego algorytmu odtwarzania ciągłego stanu z dyskretnych danych pomiarowych.
- Udowodnienie lematów i twierdzeń dotyczących oszacowania błędu estymacji, stabilności algorytmu, rozdzielności algorytmu, równoważności wprowadzonej definicji obserwowalności z klasyczną, wpływu zakłóceń na błąd predykcji.
- Opracowanie efektywnych wzorów i algorytmu wyliczania parametrów obserwatora C^0 optymalnego.
- Opracowanie sposobu wyliczania macierzy Jacobiego występującej w obserwatorze Newtona za pomocą równania wariacyjnego oraz w oparciu o wariację funkcjonału.
- Wyliczenie gradientów wskaźnika jakości minimalizowanego w algorytmie MHE na dwa sposoby.
- Wyliczenie Hesjanu tego samego wskaźnika jakości z wykorzystaniem równania wariacyjnego.
- Opracowanie metody kolokacji wyjścia i adaptacyjnych kolokacji wyjścia.

Pracę zrealizowano w ramach projektu badawczego promotorskiego, nr N N 514 417734.

Wybrane pozycje literatury

- Baranowski, J. (2007a). Approximate continuous state estimation in linear dynamical systems. W *Materiały IX Międzynarodowych Warsztatów Doktrancskich OWD 2007*, tom 1. Wisła, 20-23.10.2007, str. 11–16.
- Baranowski, J. (2007b). Approximate continuous state estimation in linear dynamical systems. W *PPEEm'2007 : materiały XII sympozjum „Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Elektromechaniki i mechatroniki”*, tom 2. Wisła, 9-12.12.2007, str. 293–298.
- Baranowski, J. (2007c). Continuous state estimation from discrete output measurements in a linear parabolic system. W *Materiały IX Międzynarodowych Warsztatów Doktrancskich OWD 2006*. Wisła, 20-23.10.2007, str. 17–22.
- Baranowski, J. (2007d). Csedom for water tank system. W *PPEEm'2007 : materiały XII sympozjum „Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Elektromechaniki i mechatroniki”*, tom 2. Wisła, 9-12.12.2007, str. 299–304.
- Baranowski, J. (2008a). Adaptive output collocations. W *Materiały X Międzynarodowych Warsztatów Doktrancskich OWD 2008*. Wisła, str. 519–524.
- Baranowski, J. (2008b). Continuous moving horizon estimation in a hydraulic system. W *Materiały X Międzynarodowych Warsztatów Doktrancskich OWD 2008*. Wisła, str. 525–530.
- Baranowski, J. (2008c). Output collocation method for continuous state estimation from discrete output measurements in linear dynamical systems. *Automatyka* **12**.
- Baranowski, J. (2009a). Optimal continuous estimation of diabetes population dynamics. W *Proceedings of XI International PhD Workshop, OWD*. Wisła, str. 146–151.

- Baranowski, J. (2009b). Patient glycemic state estimation in intensive care units. W *Proceedings of XI International PhD Workshop, OWD*. Wisła, str. 152–157.
- Baranowski, J. i Mitkowski, W. (2008). New output approximation method for continuous state estimation. W *Materiały XXXI Międzynarodowej konferencji z podstaw elektrotechniki i teorii obwodów IC-SPETO*. Ustroń, 28-31.05.2008, str. 95–96. Extended version on CD.
- Baranowski, J. i Mitkowski, W. (2009). Optimal glucose level regulation for intensive care unit patients: Csedom approach. W *Papers. 24th IFIP TC7 Conference on System Modelling and Optimization Optimal glucose level regulation for Intensive Care unit patients: CSEDOM approach*. Organized by: Herramientas Gerenciales, Palais Rouge, Buenos Aires, Argentina, str. 46–47.
- Baranowski, J. i Piątek, P. (2008). Nonlinear dynamical feedback for motion control of magnetic levitation system. W *Proceedings of 13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC*. Poznań, 1-3 September 2008, str. 1469–1476.
- Baranowski, J. i Tutaj, A. (2007). Continuous state estimation in water tank system. W *CMS'07 : Computer Methods and Systems, 21–23 November 2007, Kraków, Poland*. Kraków, 21-23.11.2007, str. 373–378.
- Baranowski, J. i Tutaj, A. (2008a). Comparison of continuous state estimation algorithms in a water tank system. W Malinowski, K. i Rutkowski, L., red., *Recent advances in control and automation*, rozdz. 2. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, str. 63–72.
- Baranowski, J. i Tutaj, A. (2008b). State and parameter estimation in a hydraulic system — moving horizon approach. W *Proceedings of 13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC*. Poznań, 1-3 September 2008, str. 1455–1462.
- Chee, F. i Fernando, T. (2007). *Closed-Loop Control of Blood Glucose*. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Górecki, R. (1997). Uniwersalny dyskretny miernik pozycji. W Mitkowski, W., red., *Prace z Automatyki dedykowane profesorowi Henrykowi Góreckiemu z okazji 70-lecia urodzin*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo Dydaktyczne AGH, str. 145–155.
- Kudrewicz, J. (1976). *Analiza funkcjonalna dla automatyków i elektroników*. PWN, Warszawa.
- Mitkowski, W. (2007). *Równania macierzowe i ich zastosowania*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2 wyd.
- Mitkowski, W. i Baranowski, J. (2007). Estimation of continuous state in linear dynamical systems from discrete output measurements. W *Materiały XXX Międzynarodowej konferencji z podstaw elektrotechniki i teorii obwodów IC-SPETO*. Ustroń, 23-26.05.2007, str. 193–194. Extended version on CD.
- Papanikolopoulos, N., Khosla, P. i Kanade, T. (1993). Visual tracking of a moving target by a camera mounted on a robot: a combination of control and vision. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* **9**(1), str. 14–35.
- Rolewicz, S. (1974). *Analiza funkcjonalna i teoria sterowania*. PWN, Warszawa.
- Sontag, E. (1995). On the input-to-state stability property. *European Journal of Control* **1**, str. 24–36.
- Van Herpe, T., Espinoza, M., Haverbeke, N., De Moor, B. i Van den Berghe, G. (2007). Glycemia prediction in critically ill patients using an adaptive modeling approach. *Journal of Diabetes Science and Technology* **1**(3), str. 348–356.