

Numeryczne aspekty sterowania optymalnego systemów z czasowo-przestrzenną dynamiką

Ewaryst Rafajłowicz, Krystyn Styczeń i
Wojciech Rafajłowicz

Zarys prezentacji

50 lat teorii DPS

Rozwój teorii

Moc obliczeniowa

Przegląd zadań

Aspekty obliczeniowe

Przegląd metod szukania extr. w zadaniach ster. opt. DPS

Filter SQP jako solver zad. ster. opt. DPS

Proponowany algorytm

Wyniki testowania

Nowe narzędzia – nowe wyzwania

Stare paradygmaty po 50 latach

Nowe urządzenia wykonawcze

Kamery jako sensory

Przykład – modelownie pasma miedzi

Bibliografia – bardzo niepełna

Uwagi wstępne

50 lat badań nad systemami "o parametrach rozłożonych" – distributed parameter systems

- ▶ **Badania nad systemami z czasowo - przestrzenną dynamiką trwają od około 50 lat !!! (Butkovski, P.K.C. Wang)**
- ▶ Część obecnej tu, starszej młodzieży uczestniczy w nich od ok. 30-35 lat.
- ▶ Czy jeszcze coś zostało do zrobienia ?
- ▶ Będę się starał przekonać młodszą młodzież, że TAK i to dużo, i to nie dlatego, że starsi byli leniwi.

Uwagi wstępne

50 lat badań nad systemami "o parametrach rozłożonych" – distributed parameter systems

- ▶ Badania nad systemami z czasowo - przestrzenną dynamiką trwają od około 50 lat !!! (Butkovski, P.K.C. Wang)
- ▶ Część obecnej tu, starszej młodzieży uczestniczy w nich od ok. 30-35 lat.
- ▶ Czy jeszcze coś zostało do zrobienia ?
- ▶ Będę się starał przekonać młodszą młodzież, że TAK i to dużo, i to nie dlatego, że starsi byli leniwi.

Uwagi wstępne

50 lat badań nad systemami "o parametrach rozłożonych" – distributed parameter systems

- ▶ Badania nad systemami z czasowo - przestrzenną dynamiką trwają od około 50 lat !!! (Butkovski, P.K.C. Wang)
- ▶ Część obecnej tu, starszej młodzieży uczestniczy w nich od ok. 30-35 lat.
- ▶ Czy jeszcze coś zostało do zrobienia ?
- ▶ Będę się starał przekonać młodszą młodzież, że TAK i to dużo, i to nie dlatego, że starsi byli leniwi.

Uwagi wstępne

50 lat badań nad systemami "o parametrach rozłożonych" – distributed parameter systems

- ▶ Badania nad systemami z czasowo - przestrzenną dynamiką trwają od około 50 lat !!! (Butkovski, P.K.C. Wang)
- ▶ Część obecnej tu, starszej młodzieży uczestniczy w nich od ok. 30-35 lat.
- ▶ Czy jeszcze coś zostało do zrobienia ?
- ▶ Będę się starał przekonać młodszą młodzież, że TAK i to dużo, i to nie dlatego, że starsi byli leniwi.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat ?

Rozwój teorii

- ▶ **Rozwój teorii – r.r.cz. jako równania w przestrzeniach Hilberta.**
- ▶ Podstawy teoretyczne nieliniowych r.r.cz., głównie metodami analizy funkcjonalnej.
- ▶ Rozwój rozwiązywania r.r.cz. – od od schematów różnicowych do udoskonaleń metody Ritza-Galerkina \Rightarrow metody elementów skończonych.
- ▶ Rozwój metod optymalizacji – rozwiązywanie "dużych" zagadnień prog. liniowego, kwadratowego.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat ?

Rozwój teorii

- ▶ **Rozwój teorii – r.r.cz. jako równania w przestrzeniach Hilberta.**
- ▶ **Podstawy teoretyczne nieliniowych r.r.cz., głównie metodami analizy funkcjonalnej.**
- ▶ Rozwój rozwiązywania r.r.cz. – od od schematów różnicowych do udoskonaleń metody Ritza-Galerkina \Rightarrow metody elementów skończonych.
- ▶ Rozwój metod optymalizacji – rozwiązywanie "dużych" zagadnień prog. liniowego, kwadratowego.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat ?

Rozwój teorii

- ▶ Rozwój teorii – r.r.cz. jako równania w przestrzeniach Hilberta.
- ▶ Podstawy teoretyczne nieliniowych r.r.cz., głównie metodami analizy funkcjonalnej.
- ▶ Rozwój rozwiązywania r.r.cz. – od od schematów różnicowych do udoskonaleń metody Ritza-Galerkina \Rightarrow metody elementów skończonych.
- ▶ Rozwój metod optymalizacji – rozwiązywanie "dużych" zagadnień prog. liniowego, kwadratowego.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat ?

Rozwój teorii

- ▶ Rozwój teorii – r.r.cz. jako równania w przestrzeniach Hilberta.
- ▶ Podstawy teoretyczne nieliniowych r.r.cz., głównie metodami analizy funkcjonalnej.
- ▶ Rozwój rozwiązywania r.r.cz. – od od schematów różnicowych do udoskonaleń metody Ritza-Galerkina \Rightarrow metody elementów skończonych.
- ▶ Rozwój metod optymalizacji – rozwiązywanie "dużych" zagadnień prog. liniowego, kwadratowego.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Teoria

- ▶ **Postęp w metodach optymalizacji nieliniowej:**
 - ▶ różne wersje SQP, trust region,
 - ▶ metody optymalizacji globalnej (deterministyczne i losowe)
- ▶ rozwój statystyki matematycznej zjawisk przestrzennych,
- ▶ popularyzacja równań o ułamkowych pochodnych cząstkowych,
- ▶ nowe opisy: automaty komórkowe, losowe pola Markowa.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Teoria

- ▶ **Postęp w metodach optymalizacji nieliniowej:**
 - ▶ **różne wersje SQP, trust region,**
 - ▶ metody optymalizacji globalnej (deterministyczne i losowe)
- ▶ rozwój statystyki matematycznej zjawisk przestrzennych,
- ▶ popularyzacja równań o ułamkowych pochodnych cząstkowych,
- ▶ nowe opisy: automaty komórkowe, losowe pola Markowa.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Teoria

- ▶ Postęp w metodach optymalizacji nieliniowej:
 - ▶ różne wersje SQP, trust region,
 - ▶ metody optymalizacji globalnej (deterministyczne i losowe)
- ▶ rozwój statystyki matematycznej zjawisk przestrzennych,
- ▶ popularyzacja równań o ułamkowych pochodnych cząstkowych,
- ▶ nowe opisy: automaty komórkowe, losowe pola Markowa.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Teoria

- ▶ Postęp w metodach optymalizacji nieliniowej:
 - ▶ różne wersje SQP, trust region,
 - ▶ metody optymalizacji globalnej (deterministyczne i losowe)
- ▶ rozwój statystyki matematycznej zjawisk przestrzennych,
- ▶ popularyzacja równań o ułamkowych pochodnych cząstkowych,
- ▶ nowe opisy: automaty komórkowe, losowe pola Markowa.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Teoria

- ▶ Postęp w metodach optymalizacji nieliniowej:
 - ▶ różne wersje SQP, trust region,
 - ▶ metody optymalizacji globalnej (deterministyczne i losowe)
- ▶ rozwój statystyki matematycznej zjawisk przestrzennych,
- ▶ popularyzacja równań o ułamkowych pochodnych cząstkowych,
- ▶ nowe opisy: automaty komórkowe, losowe pola Markowa.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Teoria

- ▶ Postęp w metodach optymalizacji nieliniowej:
 - ▶ różne wersje SQP, trust region,
 - ▶ metody optymalizacji globalnej (deterministyczne i losowe)
- ▶ rozwój statystyki matematycznej zjawisk przestrzennych,
- ▶ popularyzacja równań o ułamkowych pochodnych cząstkowych,
- ▶ nowe opisy: automaty komórkowe, losowe pola Markowa.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Moc obliczeniowa

- ▶ **Ogromny wzrost mocy obliczeniowej i rozmiarów pamięci komputerów.**
- ▶ Obliczenia równoległe, nie tylko super-komputery – także na biurku + procesory graficzne (CUDA - Nvidii itp.)
- ▶ Swój doktorat z identyfikacji parametrów r.r.cz. (1977-1979) liczyłem na Odrze 1325 z 32 kilo-słowami pamięci operacyjnej (dziś prawie nie ma ograniczeń) i kilkaset flops (bez coprocesora artym.)

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Moc obliczeniowa

- ▶ Ogromny wzrost mocy obliczeniowej i rozmiarów pamięci komputerów.
- ▶ Obliczenia równoległe, nie tylko super-komputery – także na biurku + procesory graficzne (CUDA - Nvidii itp.)
- ▶ Swój doktorat z identyfikacji parametrów r.r.cz. (1977-1979) liczyłem na Odrze 1325 z 32 kilo-słowami pamięci operacyjnej (dziś prawie nie ma ograniczeń) i kilkaset flops (bez coprocesora artym.)

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Moc obliczeniowa

- ▶ Ogromny wzrost mocy obliczeniowej i rozmiarów pamięci komputerów.
- ▶ Obliczenia równoległe, nie tylko super-komputery – także na biurku + procesory graficzne (CUDA - Nvidii itp.)
- ▶ Swój doktorat z identyfikacji parametrów r.r.cz. (1977-1979) liczyłem na Odrze 1325 z 32 kilo-słowami pamięci operacyjnej (dziś prawie nie ma ograniczeń) i kilkaset flops (bez coprocesora artym.)

Aspekty obliczeniowe

Prosty model quasi-liniowy (dla ustalenia uwagi):

$$\frac{\partial q(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a(q(x, t)) \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} \right) + (1) \\ + b(x) q(x, t) + f(x, t)$$

- ▶ $q(x, t)$ – stan w pkt. w chwili t ,
- ▶ $f(x, t)$ – sterowanie (lub zakłócenie),
- ▶ war. brzegowe, np, $q_x(0, t) \equiv 0$,
 $q(0, t) = u(t)$ – sterowanie
- ▶ war. początkowy: $q(x, 0) = q_0(x)$.

Aspekty obliczeniowe

Prosty model quasi-liniowy 2

Zakładamy, że rozwiązanie q równania(1) (w sensie uogólnionym) istnieje i jest jedyne dla wszystkich "dopuszczalnych" $u(\cdot)$, $f(\cdot, \cdot)$.

- ▶ Zależność q od $u(\cdot)$ oznaczamy $q(x, t; u)$ (podobnie, dla $f(\cdot, \cdot)$ oraz $a(\cdot)$).
- ▶ Zakładamy, że zależność: $u \rightarrow q(x, t; u)$ jest ciągła (w normach tych przestrzeni, w których rozpatrujemy q i u) (dotyczy to także $a(\cdot)$ i $f(\cdot)$, gdy to wzgl. nich minimalizujemy).

Aspekty obliczeniowe

Wskaźniki jakości i ograniczenia

Optymalizację numeryczną "wprost" powinno się stosować tam, gdzie nie ma "dobrych" warunków optymalności, np, gdy mamy (jedno lub więcej z):

- ▶ nieliniowy (quasi-liniowy) obiekt,
- ▶ "nietypowe" kryteria,
- ▶ ograniczenia na stan i/lub nieliniowe (oraz nie-kwadratowe) ograniczenie na sterowania.

Przykładowe zadanie sterowania:

Niech $T > 0$ – horyzont sterowania, $q^*(x)$ – pożądany stan końcowy. Załóżmy, że $q^*(x)$ i $q(x, T, ; u)$ ciągłe wzgl. $x \in X$.

$$\min_{u \in U} \sup_{x \in X} |q^*(x) - q(x, T, ; u)| \quad (*)$$

$$\sum_{i=1}^l |q(x_{i+1}, T, ; u) - q(x_i, T, ; u)| \leq C$$

(ogr. na naprężenia cieplne). Nie wiemy czy rozw. istnieje, ale można liczyć i badać "sensowność" tego co wyjdzie.

Przykładowe zadanie sterowania czujnikiem dla identyfikacji

$b(x)$ w równaniu (1) jest nieznane i przybliżamy je $b(x) = \bar{b}' \bar{\phi}(x)$, gdzie \bar{b} nieznane współczynniki, $\bar{\phi}(x)$ wybrane funkcje bazowe (np f. sklejjane). \bar{b} estymujemy na podstawie obserwacji:

$$y_i = q(\kappa(t_i), t_i; \bar{b}) + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, l, \quad (2)$$

gdzie ϵ_i zakłócenia losowe, $E(\epsilon_i) = 0$, $E(\epsilon_i^2) = \sigma^2 < \infty$. $\kappa(t)$ – trajektoria ruchomego czujnika o dynamice opisanej znanym równaniem $\dot{\kappa}(t) = F(\kappa(t), v(t))$, $v(t)$ – sterowanie czujnika.

Przykładowe zadanie sterowania czujnikiem dla identyfikacji

Dokładność estymacji \bar{b} opisuje mac. inf.

$$M(v(.)) = \sum_{i=1}^I \nabla_{\bar{b}} q(\kappa(t_i), t_i; \bar{b}) (\nabla_{\bar{b}} q(\kappa(t_i), t_i; \bar{b}))'$$

Zadanie: znaleźć dopuszczalne sterowanie $v(.)$ ruchem czujnika takie, że osiągnane jest

$$\max_{v(.)} \det [M(v(.))], \quad \dot{\kappa}(t) = F(\kappa(t), v(t))$$

i ograniczenie (1). Trudne – duże zasługi ma Prof. D. Uciński (monografia w CRC Press i liczne oryginalne artykuły na temat metod obliczeniowych).

Dyskretyzacja zadania sterowania

Niech x_i , $i = 1, 2, \dots, l$ – węzły siatki lub centra elem. skończonych. Załóżmy, że zadanie zostało "dobrze" zdyskretyzowane.

Niech $q_{i,j} = q(x_i, t_j)$ – wartości stanu w węzłach siatki lub centrach elem. skończ.,

Q – macierz $q_{i,j}$ W szczególności:

- ▶ $u(t) = \bar{u} \bar{\psi}(t)$, gdzie \bar{u} wektor podlegający wyborowi, $\bar{\psi}(t)$ – wektor znanych funkcji (dla $f(x, t)$, odp.).
- ▶ Wskaźnik jakości sterowania: $J(Q, \bar{u})$, np $J(Q, \bar{u}) = \max_i |q^*(x_i) - q(x_i, T; \bar{u})|$ lub $J(Q, \bar{u}) = \sum_{i=1}^l (q^*(x_i) - q(x_i, T; \bar{u}))^2$.

Dyskretyzacja zadania sterowania 2

- ▶ zdyskretyzowane r.r.rcz. $\mathcal{A}(Q, \bar{u}) = \bar{0}$ – jako ograniczenia (wraz z war. pocz.)
- ▶ zdyskretyzowane ograniczenia na stan i/lub sterowanie: $\mathcal{C}(Q, \bar{u}) \leq \bar{0}$,
- ▶ \mathcal{A} i \mathcal{C} – odwzorowania (nielin.) o wart. wektorowych.

Zdyskretyzowane zadanie sterowania:
znaleźć \bar{u}^* takie, że

$$\min_{\bar{u}} J(Q, \bar{u}), \quad \mathcal{A}(Q, \bar{u}) = \bar{0}, \quad \mathcal{C}(Q, \bar{u}) = \bar{0} \quad (3)$$

Przegląd podejść do szukania opt.

Niech \bar{u}_k – wsp. sterowania w k -tej iteracji.

Podejście I – bezgradientowe:

1. W k -tej iteracji oblicza się Q_k – rozwiązanie r.r.cz. $\mathcal{A}(Q, \bar{u}_k) = \bar{0}$ i $J(Q_k, \bar{u}_k)$.
2. Bezgradientowa procedura opt. (np Nealdera-Meada) – wylicza \bar{u}_{k+1} .
3. Ponownie r.r.cz. $\mathcal{A}(Q_{k+1}, \bar{u}_{k+1}) = \bar{0}$, jeśli $J(Q_{k+1}, \bar{u}_{k+1}) < J(Q_k, \bar{u}_k)$ oraz $\mathcal{C}(Q_{k+1}, \bar{u}_{k+1}) \leq \bar{0}$, to akceptuj \bar{u}_{k+1} i goto 1).
4. Jeśli nie, to "skróć" krok i goto 2).

Przegląd podejść do szukania opt. 2

Podejście II A – gradientowe, quasi 2-go rzędu, Sekwencyjne programowanie kwadratowe (SQP), bez rozw. równań wrażliwości.

- ▶ W k -tej iteracji oblicza się Q_k – rozwiązanie r.r.cz. $\mathcal{A}(Q, \bar{u}_k) = \bar{0}$ i $J(Q_k, \bar{u}_k)$.
- ▶ Etap 1) powtarzany $\dim(\bar{u})$ -krotnie w celu przybliżenia gradientu J w (Q_k, \bar{u}_k) .
- ▶ $\bar{u}_{k+1} = \bar{u}_k + \gamma_k d_k$, gdzie d_k – kierunek poprawy wyznacza się w wyniku rozwiązania

Przegląd podejść do szukania opt. 3

zadania optymalizacji z kwadratową f. celu:

- ▶ $J(Q_k, \bar{u}_k + d) \approx J(Q_k, \bar{u}_k) + d' g_k + d' H_k d/2$, ogr. linearyzowane:
- ▶ $\mathcal{C}(Q_k, \bar{u}_k) + C_k d \leq 0$, gdzie
- ▶ C_k – Jakobian odwzorowania \mathcal{C} liczony dla (Q_k, \bar{u}_k) . Uwaga: C_k musi być liczone z uwzgl. zależności Q od \bar{u} poprzez rozwiązanie r.r.cz.
- ▶ Mnóstwo odmian, różniących się:
 1. doborem współczynnika γ_k (podejścia typu "trust region")
 2. sposobem rozw. zadania programowania kwadratowego

Przegląd podejść do szukania opt. 4

- ▶ oraz traktowania ograniczeń:
- ▶ metody wewnętrznej ścieżki,
- ▶ barierowe,
- ▶ prymalne ze zbiorem aktywnych ograniczeń,
- ▶ prymalno-dualne itp.
- ▶ Wersja II B tego podejścia różni się sposobem szacowania gradientu J poprzez rozwiązywanie r.r.cz. wrażliwości stanu na zmiany sterowań lub poprzez rozwiązywanie równań sprzężonych (kłopoty numeryczne).

Przegląd podejść do szukania opt. 5

- ▶ Wersja II C (chyba nie była badana), polegałaby na traktowaniu zdyskretyzowanych równań stanu jak ograniczeń.
- ▶ Osobnym wątkiem, który może być "kombinowany" z każdym z w/w podejść, jest sposób przybliżania r.r.cz.
- ▶ standardowe podejścia: dyskretyzacja na siatce prostokątnej i różne wersje metody elementów skończonych
- ▶ mają alternatywę w postaci rozwinięć modalnych.

Filter SQP

Jako wstęp do filtrowanego sekwencyjnego programowania kwadratowego zacytujmy za pracą Audet, Dennis (2004) [1]:

- ▶ Filter algorithms were introduced by Fletcher and Leyffer [14] as a way to globalize sequential linear programming (SLP) and sequential quadratic programming (SQP)
- ▶ without using any merit function that would require a troublesome parameter to be provided by the user for weighting the relative merits of improving feasibility and optimality.

Filter SQP 2

- ▶ A filter algorithm introduces a function that aggregates constraint violations and then treats the resulting biobjective problem.
- ▶ A step is accepted if it reduces the value either of the objective function or of the constraint violation.

Although this clearly is less parameter dependent than a penalty function, or an augmented Lagrangian, still we acknowledge that specifying a constraint violation function implies assigning relative weights to reducing each constraint.

Filter SQP 3

- ▶ Fletcher et al. [15, 16] show convergence of the filter method that uses SQP or SLP to suggest steps.
- ▶ Numerical results for their filter methods are very promising."

My również unajemy to podejście za bardzo obiecujące jako narzędzie do poszukiwania sterowań optymalnych dla nieliniowych DPS. Aby wyjaśnić dlaczego, rozważmy ważny szczegół tego podejścia.

Filter SQP 4 A

- ▶ Minimalizacja wzgl. d

$$J(Q_k, \bar{u}_k) + d' g_k + d' H_k d/2,$$

- ▶ przy li- nearyzowanych ograniczeniach $C(Q_k, \bar{u}_k) + C_k d \leq 0$,
- ▶ nie daje gwarancji, że \bar{u}_{k+1} będzie spełniać ograniczenia $C(Q_k, \bar{u}_{k+1}) \leq 0$.
- ▶ Dlatego wprowadza się funkcję o wartościach w R^+ , która mierzy stopień niespełnienia ogr. $C(Q, \bar{u}) \leq 0$ przez parę (Q, \bar{u}) – oznaczmy ją przez $W(Q, \bar{u})$.

Filter SQP 4 B

Uwaga: metoda filtrowanego SQP jest metodą ogólnej optymalizacji i w funkcji $W(\cdot)$ nie wydziela się jej argumentów. W naszym przypadku wydzielenie (Q, \bar{u}) jest celowe.

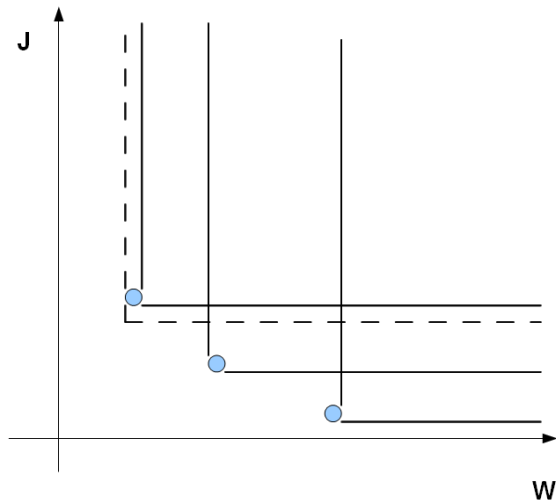
- ▶ Przykład funkcji W . Niech $I(Q, \bar{u})$ będzie zbiorem tych indeksów i , dla których $c^{(i)}(Q, \bar{u}) > 0$. Jeśli $I(Q, \bar{u}) = \emptyset$, wówczas $W(Q, \bar{u}) = 0$, gdy nie, to:

$$W(Q, \bar{u}) = \sum_{i \in I(Q, \bar{u})} \left(c^{(i)}(Q, \bar{u}) \right)^2.$$

Filter SQP 5 A

- ▶ Zgodnie z ideami wielo-kryterialnej optymalizacji mówimy, że rozwiązanie (Q_k, \bar{u}_k) dominuje nad (Q_j, \bar{u}_j) , jeśli:
 $J(Q_k, \bar{u}_k) < J(Q_j, \bar{u}_j)$ oraz
 $W(Q_k, \bar{u}_k) < W(Q_j, \bar{u}_j)$.
- ▶ Filtrem SQP nazywa się zbiór \mathcal{F} par $(J(Q_k, \bar{u}_k), W(Q_k, \bar{u}_k))$, w którym żadna para nie dominuje innej (jest "lepsza" ze względu na jedno z kryteriów, a "gorsza" ze względu na drugie).

Filter SQP 5 B



Obszary filtru dominowane przez 3 pkt-y \mathcal{F} .

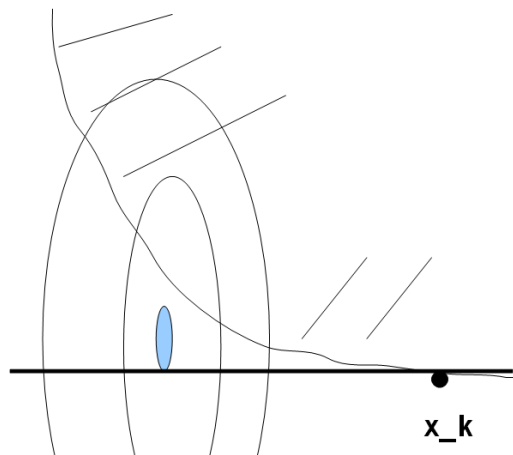
Filter SQP 6

- ▶ Filtr \mathcal{F} akceptuje (w danej iteracji) parę $(J(Q_k, \bar{u}_k), W(Q_k, \bar{u}_k))$, jeśli nie jest ona dominowana przez żadną parę z \mathcal{F} .
- ▶ Para $(J(Q_k, \bar{u}_k), W(Q_k, \bar{u}_k))$, którą \mathcal{F} akceptuje może być do niego włączona (wówczas usuwa się z \mathcal{F} wszystkie pary dominowane przez tę wprowadzaną).
- ▶ Warunkiem wykonania kroku \bar{u}_{k+1} jest sprawdzenie, czy filtr akceptuje parę (J_{k+1}, W_{k+1}) .

Filter SQP 7

- ▶ Znane sa dwie podstawowe wersje SQP z filtrem, Fletcher ... 1999 i 2002.
- ▶ Wersja z 1999 jest "kłopotliwa" – wymaga rozkładu \bar{u}_k na dwie składowe: normalną i styczną do ograniczeń (rzut).
- ▶ Wersja 2002 lepiej nadaje się do zmodyfikowania jej do zadań ster. opt. DPS – jako krok "restauracji" ograniczeń wykonuje się minimalizację W (u nas: start z \bar{u}_k , $\min_{\bar{u}} W(Q, \bar{u})$, przy ogr. r.r.cz., otrzymane \bar{u}_k^* zastępuje \bar{u}_k przy linear.).

Filter SQP 7 B



Punkt x_k w następnej iteracji SQP z linearyzowanymi ogr. "wyląduje" w niebieskim polu, poza obszarem dopuszczalnym (kreski ukośne).

Filtrowane SQP do ster. DPS

Proponowany "algorytm"

1. Jeśli zbiór dopuszcz. przy zlinearyzowanych ograniczeniach $\mathcal{C}(Q_k, \bar{u}_k) + C_k d \leq 0$ jest \emptyset , \Rightarrow faza "restauracji" ogr.
2. W k -tym kroku min. wzgl. d

$$J(Q_k, \bar{u}_k) + d' g_k + d' H_k d / 2,$$

3. przy przy w.w. zlinearyzowanych ogr.
4. Rozwiąż r.r.cz. z $\bar{u}_{k+1} = \bar{u}_k + d_k \Rightarrow Q_{k+1}$.
5. $J_{k+1} \stackrel{\text{def}}{=} J(Q_{k+1}, \bar{u}_{k+1})$,
 $W_{k+1} \stackrel{\text{def}}{=} W(Q_{k+1}, \bar{u}_{k+1})$.

Filtrowane SQP do ster. DPS 2

- ▶ Jeśli (J_{k+1}, W_{k+1}) akceptowane przez \mathcal{F}
 - ▶ zaakceptuj \bar{u}_{k+1} , $(J_{k+1}, W_{k+1}) \Rightarrow \mathcal{F}$.
 - ▶ usuń z \mathcal{F} pary dominowane przez (J_{k+1}, W_{k+1}) ,
 - ▶ zwiększ rozmiar obszaru zaufania ρ .
- ▶ Jeśli NIE,
 - ▶ odrzuć \bar{u}_{k+1} ($\bar{u}_{k+1} \Leftarrow \bar{u}_k$),
 - ▶ zmniejsz rozmiar obszaru zaufania ρ .
- ▶ $k := k + 1$ i go to 1).

Filtrowane SQP do ster. DPS 3

- ▶ Obszar zaufania, to dodatkowe ograniczenie nakładane przy rozw. QP, na d , (zwykle $\|d\|^2 \leq \rho$), by zapewnić zbieżność. Zbyt małe ρ może być powodem, że zbiór dopuszczalny dla QP może być pusty.
- ▶ Quasi-liniowe r.r.cz. rozwiązywane jako:
 - ▶ "nieliniowe"
 - ▶ liniowe – do wsp. wstawiamy Q_k
- ▶ "Ogólne", filtrowane SQP ma dowód zbieżności [2].

Filtrowane SQP do ster. DPS 4

- ▶ Można mieć nadzieję, że i tu uda się "zestroić" dokładność rozw. r.r.cz. z SQP, tak by udowodnić zbieżność.
- ▶ "Ogólne" filtrowane SQP ma wersję z włączaniem sekwencyjnego LP [2] (linearyzowane J i \mathcal{C}) w celu znalezienia punktu spełniającego ograniczenia.
- ▶ Można rozważyć uogólnienie – filtr stosować co kilka kroków SQP, a nie, j.w., w każdym.

Przykład obl. - założenia 1

$$\frac{\partial q(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a(q) \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} \right) + f(x, t)$$

- ▶ $f(x, t) = 1(x) u(t)$ – sterowanie
- ▶ war. brzegowe, np, $q_x(0, t) \equiv 0$,
 $q(0, t) \equiv 0$
- ▶ war. początkowy: $q(x, 0) = q_0(x)$
- ▶ $a(q) = [(1 + \kappa \nabla_x q)^2]^{-1}$ – "dziki" wsp. dyfuzji – hamuje ją, tam, gdzie są duże zmiany q . Perrona-Malik, $\kappa = 1/30$.

Przykład obl. - założenia 2

Wskaźnik jakości sterowania (kryterium):

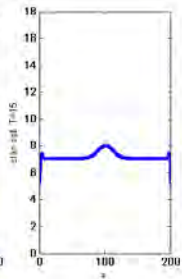
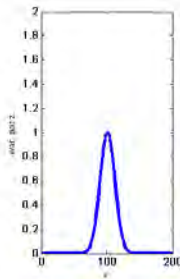
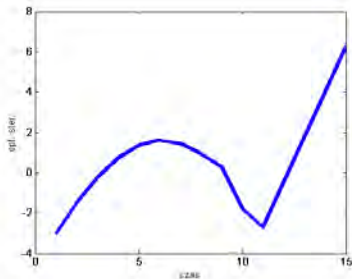
$$Q(u(.)) = \int_0^1 [q^* - q(x, T)]^2 dx, \quad q^* \equiv 3.$$

R.r.cz. na siatce (jawny schemat) w pkt-ach $x_i = i\Delta x$, $i = 1 \dots 201$ $t_n = n\Delta t$, $\Delta t = 0.3$, $n = 1, \dots, N$. Ograniczenia – nie chcemy dużych zmian w q (wzdł. x -ów) i u w czasie: $i = 2, \dots, 200$, $(q(x_{i+1}, t_N) - q(x_i, t_N))^2 \leq 1$, $(u(t_{n+1}) - u(t_n))^2 < 5$, $n = 1, \dots, N$. Dla $N = 15$ – razem 213 ogr. nieliniowych + 15 $u(t_n) \leq 15$ (dopuszczamy ujemne !)

Przykład obl. – uwagi

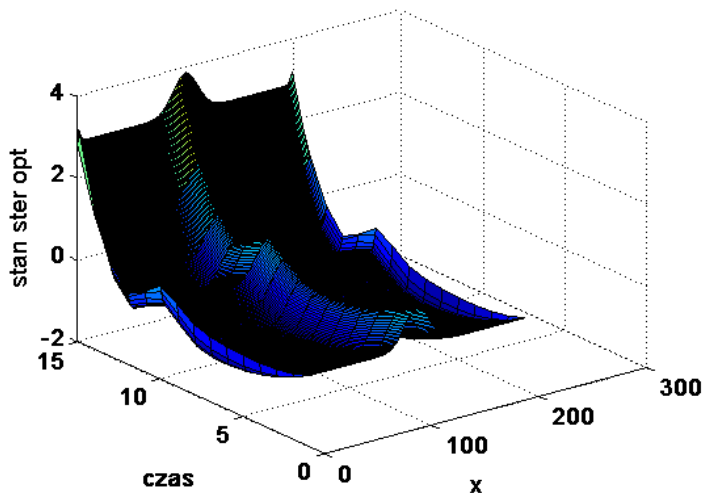
- ▶ Nie twierdzimy, że tak należy rozwiązywać numeryczne problemy dla DPS.
- ▶ Przykład sztuczny – "wredny".
- ▶ $q(x, 0) = \exp(-0.4 x^2)$ i chcemy po 15 krokach sterowania osiągnąć stan $q^* = 3$, za pom. sterowania stałego wzdł. x -ów.
- ▶ Cel: przetestować proponowany wariant solvera: filter SQP we współpracy z rozw. r.r.cz. + ok. 230 ograniczeń.
- ▶ Wersja z grad. kryt. obliczanym z przyrostów i przybl. hesjanem. Jako składnika metody filter SQP użyto procedury Matlab'a – fmincon.

Przykład obl. 1 A



Sterowanie "optymalne" (lewy) oraz stan startowy i stan końcowy $T = 15$ "optymalny" (prawy). Kryterium = 15.0 – uzyskane dużym nakładem obliczeń – będzie to punkt odniesienia.

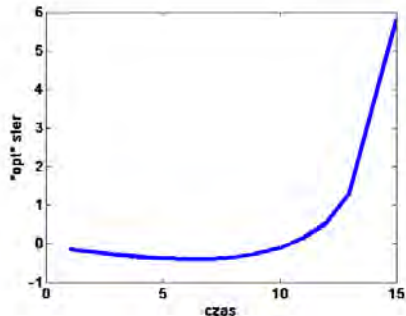
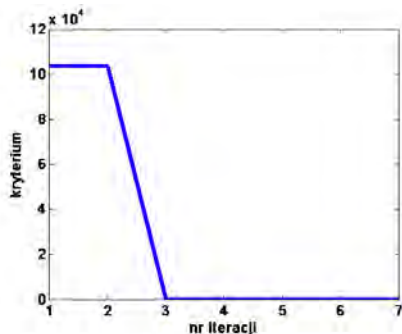
Przykład obl. 1 B



L. obl. wart. fun. =556

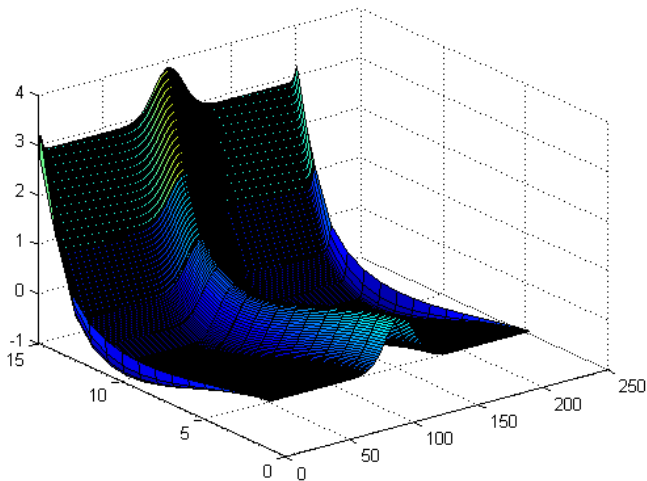
Przykład obl. 1 C

Przebieg 2 – "daleki start"



Kryt.=15.1, czas=9 sek., (Matlab ver. 7.2, procesor i7, 2.67 GHz). "Wredny przykład" - dopiero, gdy kryterium < 15.03 – ster. w przybliżeniu opt. ma ten sam kształt co kształt ster. opt.

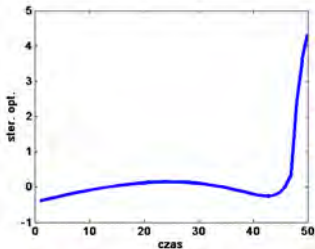
Przykład obl. 1 D



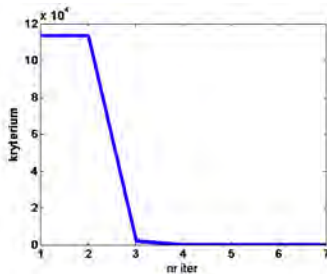
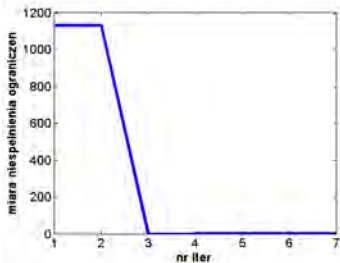
W konsekwencji – nieco inny przebieg stanu dla ster.
w przybl. opt. L. obl. wart. fun. = 438.

Przykład obl. 1 E

Wydłużamy horyzont sterowania i liczbę zmiennych decyzyjnych z 15 do 50

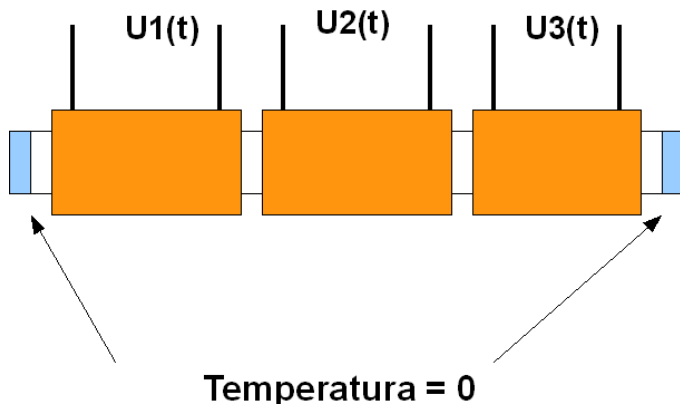


kryt.=13.44,
czas obl.=65 sec.,
Liczba obl. f.=1360
miara niesp. ogr. szybko
maleje do 0 i jeśli potem
wzrasta, to nieznacznie (raz
do 0.35).



Przykład obl. 2

Zwiększamy możliwości sterowania –
zamiast ster. jednakowego wzdl. całej
długości stosujemy:

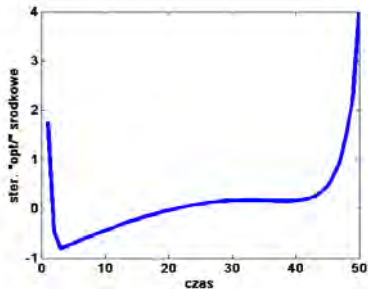
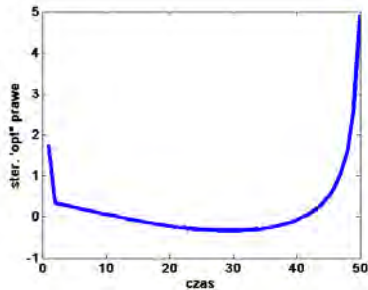
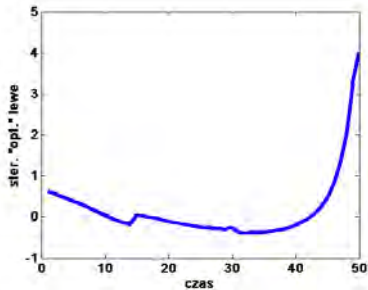


$t = 1, 2, \dots, 50.$

Przykład obl. 2 B

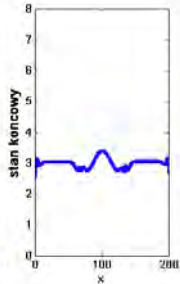
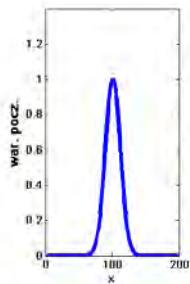
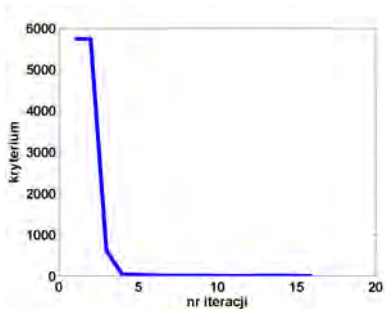
- ▶ 150 zmiennych decyzyjnych
- ▶ ok. 500 ograniczeń (na stan i sterowania)
- ▶ $\text{funeval}=12221$
- ▶ $\text{czas}=561$ sec
- ▶ $\text{crit}=4.89$
- ▶ Wniosek: mimo dość dużych rozmiarów zadania procedura filter SQP radzi sobie bardzo dobrze.

Przykład obl. 2 C



Ster. "opt."
lewe, prawe
środkowe (dół).

Przykład obl. 2 D



Wsk. jakości, stan pocz., stan końcowy.

Przykład obl. 3

- ▶ Jak wspomiano, celem było zbadanie "wydolności" i współpracy solvera filter SQP solverem r.r.cz.
- ▶ Z tego powodu zmiennymi decyzyjnymi były wprost wartości 3 funkcji sterowań w 50 chwilach.
- ▶ Powyższe zadanie można rozwiązać prościej – namęczywszy komputer znacznie mniej. Jeśli przyjmiemy:

$$u_k(t) = \sum_{n=1}^N U_n(k) B_n(t), \quad k = 1, 2, 3,$$

Przykład obl. 3 B

- ▶ gdzie $B_n(t)$ spliny kubiczne, $U_n(k)$ współczynniki podlegające wyborowi, to zadanie z przykł. 2
- ▶ czas obl. 46 sec.,
- ▶ liczba obl. wart. fun. celu = 1040
- ▶ ponad 10 razy krótszy czas i liczba obl. wart. fun. celu.
- ▶ Bardzo podobne przebiegi – nie rysujemy.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Stare paradygmaty

- ▶ **Dwa dawne paradygmaty:**
 - ▶ 1) punktowe obserwacje,
 - ▶ 2) punktowe lub brzegowe wymuszenia.
- ▶ Paradygmaty te na dziesięciolecia zdeterminowały rozwój teorii sterowania.
- ▶ Praktycznie nie dawało się opublikować artykułu, który dopuszczał rozłożone w przestrzeni obserwacje i/lub sterowania.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Stare paradygmaty

- ▶ Dwa dawne paradygmaty:
 - ▶ **1) punktowe obserwacje,**
 - ▶ 2) punktowe lub brzegowe wymuszenia.
- ▶ Paradygmaty te na dziesięciolecia zdeterminowały rozwój teorii sterowania.
- ▶ Praktycznie nie dawało się opublikować artykułu, który dopuszczał rozłożone w przestrzeni obserwacje i/lub sterowania.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Stare paradygmaty

- ▶ Dwa dawne paradygmaty:
- ▶ 1) punktowe obserwacje,
- ▶ 2) punktowe lub brzegowe wymuszenia.
- ▶ Paradygmaty te na dziesięciolecia zdeterminowały rozwój teorii sterowania.
- ▶ Praktycznie nie dawało się opublikować artykułu, który dopuszczał rozłożone w przestrzeni obserwacje i/lub sterowania.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Stare paradygmaty

- ▶ Dwa dawne paradygmaty:
- ▶ 1) punktowe obserwacje,
- ▶ 2) punktowe lub brzegowe wymuszenia.
- ▶ **Paradygmaty te na dziesięciolecia zdeteminowały rozwój teorii sterowania.**
- ▶ Praktycznie nie dawało się opublikować artykułu, który dopuszczał rozłożone w przestrzeni obserwacje i/lub sterowania.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Stare paradygmaty

- ▶ Dwa dawne paradygmaty:
 - ▶ 1) punktowe obserwacje,
 - ▶ 2) punktowe lub brzegowe wymuszenia.
- ▶ Paradygmaty te na dziesięciolecia zdeterminowały rozwój teorii sterowania.
- ▶ **Praktycznie nie dawało się opublikować artykułu, który dopuszczał rozłożone w przestrzeni obserwacje i/lub sterowania.**

Co się wydarzyło w okresie 50 lat Urządzenia

- ▶ **Proponujemy nowe spojrzenie na te paradygmaty. Dlaczego ?**
- ▶ Nastąpił szybki rozwój mikropro - cesorowych sterowników lokalnych.
- ▶ Bardzo poszerzyła się klasa urządzeń wykonawczych:
 - ▶ piezo-elektryki + taśmy plastikowe,
 - ▶ lasery dużej mocy,
 - ▶ to przykłady przestrzennie rozłożonych wymuszeń.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat Urządzenia

- ▶ Proponujemy nowe spojrzenie na te paradygmaty. Dlaczego ?
- ▶ **Nastąpił szybki rozwój mikropro - cesorowych sterowników lokalnych.**
- ▶ Bardzo poszerzyła się klasa urządzeń wykonawczych:
 - ▶ piezo-elektryki + taśmy plastikowe,
 - ▶ lasery dużej mocy,
 - ▶ to przykłady przestrzennie rozłożonych wymuszeń.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat Urządzenia

- ▶ Proponujemy nowe spojrzenie na te paradygmaty. Dlaczego ?
- ▶ Nastąpił szybki rozwój mikropro - cesorowych sterowników lokalnych.
- ▶ **Bardzo poszerzyła się klasa urządzeń wykonawczych:**
 - ▶ piezo-elektryki + taśmy plastikowe,
 - ▶ lasery dużej mocy,
 - ▶ to przykłady przestrzennie rozłożonych wymuszeń.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat Urządzenia

- ▶ Proponujemy nowe spojrzenie na te paradygmaty. Dlaczego ?
- ▶ Nastąpił szybki rozwój mikropro - cesorowych sterowników lokalnych.
- ▶ Bardzo poszerzyła się klasa urządzeń wykonawczych:
 - ▶ piezo-elektryki + taśmy plastikowe,
 - ▶ lasery dużej mocy,
 - ▶ to przykłady przestrzennie rozłożonych wymuszeń.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat Urządzenia

- ▶ Proponujemy nowe spojrzenie na te paradygmaty. Dlaczego ?
- ▶ Nastąpił szybki rozwój mikropro - cesorowych sterowników lokalnych.
- ▶ Bardzo poszerzyła się klasa urządzeń wykonawczych:
 - ▶ piezo-elektryki + taśmy plastikowe,
 - ▶ lasery dużej mocy,
 - ▶ to przykłady przestrzennie rozłożonych wymuszeń.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat Urządzenia

- ▶ Proponujemy nowe spojrzenie na te paradygmaty. Dlaczego ?
- ▶ Nastąpił szybki rozwój mikropro - cesorowych sterowników lokalnych.
- ▶ Bardzo poszerzyła się klasa urządzeń wykonawczych:
 - ▶ piezo-elektryki + taśmy plastikowe,
 - ▶ lasery dużej mocy,
 - ▶ **to przykłady przestrzennie rozłożonych wymuszeń.**

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Kamery

- ▶ **Kamery przemysłowe w świetle widzialnym:**
 - ▶ osiągają rozdzielczość 5-10 MPix,
 - ▶ pozwalają na pomiary przestrzennie rozłożone o dużej precyzji,
 - ▶ tanimi kamerami można rejestrować drgania 100-200 fps.
- ▶ Kamery w podczerwieni potaniały;
 - ▶ typowa rozdzielczość 640x480,
 - ▶ pozwalają na przestrzenny pomiar i rejestrację temperatury z dokł. 0.1°C .

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Kamery

- ▶ Kamery przemysłowe w świetle widzialnym:
 - ▶ **osiągają rozdzielczość 5-10 MPix,**
 - ▶ pozwalają na pomiary przestrzennie rozłożone o dużej precyzji,
 - ▶ tanimi kamerami można rejestrować drgania 100-200 fps.
- ▶ Kamery w podczerwieni potaniały;
 - ▶ typowa rozdzielczość 640x480,
 - ▶ pozwalają na przestrzenny pomiar i rejestrację temperatury z dokł. 0.1°C .

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Kamery

- ▶ Kamery przemysłowe w świetle widzialnym:
 - ▶ osiągają rozdzielczość 5-10 MPix,
 - ▶ **pozwalają na pomiary przestrzennie rozłożone o dużej precyzji,**
 - ▶ tanimi kamerami można rejestrować drgania 100-200 fps.
- ▶ Kamery w podczerwieni potaniały;
 - ▶ typowa rozdzielczość 640x480,
 - ▶ pozwalają na przestrzenny pomiar i rejestrację temperatury z dokł. 0.1°C .

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Kamery

- ▶ Kamery przemysłowe w świetle widzialnym:
 - ▶ osiągają rozdzielczość 5-10 MPix,
 - ▶ pozwalają na pomiary przestrzennie rozłożone o dużej precyzji,
 - ▶ **taniami kamerami można rejestrować drgania 100-200 fps.**
- ▶ Kamery w podczerwieni potaniały;
 - ▶ typowa rozdzielczość 640x480,
 - ▶ pozwalają na przestrzenny pomiar i rejestrację temperatury z dokł. 0.1°C .

Co się wydarzyło w okresie 50 lat Kamery

- ▶ Kamery przemysłowe w świetle widzialnym:
 - ▶ osiągają rozdzielczość 5-10 MPix,
 - ▶ pozwalają na pomiary przestrzennie rozłożone o dużej precyzji,
 - ▶ tanimi kamerami można rejestrować drgania 100-200 fps.
- ▶ Kamery w podczerwieni potaniały;
 - ▶ typowa rozdzielczość 640x480,
 - ▶ pozwalają na przestrzenny pomiar i rejestrację temperatury z dokł. 0.1°C .

Co się wydarzyło w okresie 50 lat

Kamery

- ▶ Kamery przemysłowe w świetle widzialnym:
 - ▶ osiągają rozdzielczość 5-10 MPix,
 - ▶ pozwalają na pomiary przestrzennie rozłożone o dużej precyzji,
 - ▶ tanimi kamerami można rejestrować drgania 100-200 fps.
- ▶ Kamery w podczerwieni potaniały;
 - ▶ **typowa rozdzielczość 640x480,**
 - ▶ pozwalają na przestrzenny pomiar i rejestrację temperatury z dokł. 0.1°C .

Co się wydarzyło w okresie 50 lat Kamery

- ▶ Kamery przemysłowe w świetle widzialnym:
 - ▶ osiągają rozdzielczość 5-10 MPix,
 - ▶ pozwalają na pomiary przestrzennie rozłożone o dużej precyzji,
 - ▶ tanimi kamerami można rejestrować drgania 100-200 fps.
- ▶ Kamery w podczerwieni potaniały;
 - ▶ typowa rozdzielczość 640x480,
 - ▶ pozwalają na przestrzenny pomiar i rejestrację temperatury z dokł. $0.1^{\circ} C$.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat Sensory

- ▶ **Mikrosensory w mikro-skali (np termistory w mikroprocesorach),**
- ▶ MEMS (czujniki przyspieszenia, magnetyczne),
- ▶ Sieci mikro- i nano-sensorów rozrzucone na dużych obszarach i mogące wymieniać się wynikami pomiarów.
- ▶ Ruchome, sterowalne sensory przestały być wymysłem teoretyków.
- ▶ Wszystkie te osiągnięcia teoretyczne i techniczne otwierają nowe pola badawcze w dziedzinie sterowania DPS.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat Sensory

- ▶ Mikrosensory w mikro-skali (np termistory w mikroprocesorach),
- ▶ **MEMS (czujniki przyspieszenia, magnetyczne),**
- ▶ Sieci mikro- i nano-sensorów rozrzucone na dużych obszarach i mogące wymieniać się wynikami pomiarów.
- ▶ Ruchome, sterowalne sensory przestały być wymysłem teoretyków.
- ▶ Wszystkie te osiągnięcia teoretyczne i techniczne otwierają nowe pola badawcze w dziedzinie sterowania DPS.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat Sensory

- ▶ Mikrosensory w mikro-skali (np termistory w mikroprocesorach),
- ▶ MEMS (czujniki przyspieszenia, magnetyczne),
- ▶ **Sieci mikro- i nano-sensorów rozrzucone na dużych obszarach i mogące wymieniać się wynikami pomiarów.**
- ▶ Ruchome, sterowalne sensory przestały być wymysłem teoretyków.
- ▶ Wszystkie te osiągnięcia teoretyczne i techniczne otwierają nowe pola badawcze w dziedzinie sterowania DPS.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat Sensory

- ▶ Mikrosensory w mikro-skali (np termistory w mikroprocesorach),
- ▶ MEMS (czujniki przyspieszenia, magnetyczne),
- ▶ Sieci mikro- i nano-sensorów rozrzucone na dużych obszarach i mogące wymieniać się wynikami pomiarów.
- ▶ **Ruchome, sterowalne sensory przestały być wymysłem teoretyków.**
- ▶ Wszystkie te osiągnięcia teoretyczne i techniczne otwierają nowe pola badawcze w dziedzinie sterowania DPS.

Co się wydarzyło w okresie 50 lat Sensory

- ▶ Mikrosensory w mikro-skali (np termistory w mikroprocesorach),
- ▶ MEMS (czujniki przyspieszenia, magnetyczne),
- ▶ Sieci mikro- i nano-sensorów rozrzucone na dużych obszarach i mogące wymieniać się wynikami pomiarów.
- ▶ Ruchome, sterowalne sensory przestały być wymysłem teoretyków.
- ▶ **Wszystkie te osiągnięcia teoretyczne i techniczne otwierają nowe pola badawcze w dziedzinie sterowania DPS.**

Przykład – kamera jako "czujnik"



Figure: Fragment pasma miedzi – wystudzony

Przykład – kamera jako "czujnik"

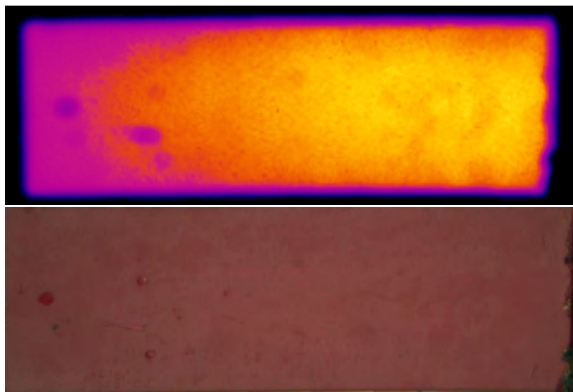


Figure: Ten sam fragment pasma nagrany do 830 C: w świetle widzialnym i w poczerwieni (kolorowany)

Przykład – kamera jako "czujnik" 3

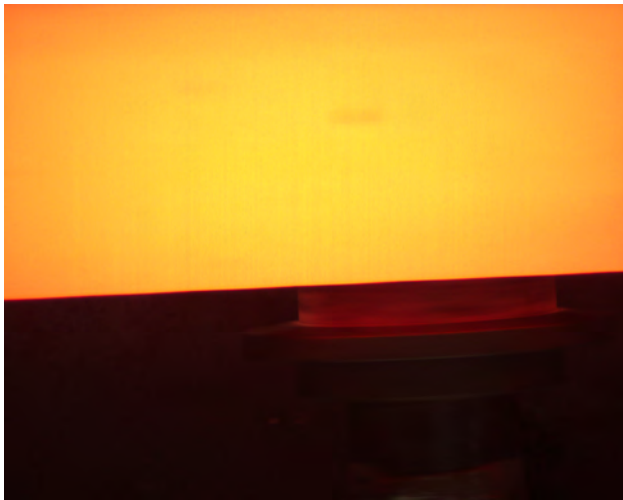


Figure: Pasma "na żywo" – z hali produkcyjnej

Przykładzik modelowania przekroju poprzecznego z otworem

Podstawowe założenia upraszczające to:

1. rozptyw temperatury wewnątrz materiału można uznać za stacjonarny,
2. zagadnienie jest liniowe – współczynnik przewodnictwa nie zależy od temperatury,
3. rozpatrujemy otwory o przekroju kołowym rozciągające się na długim odcinku wzdłuż osi materiału.

Założenia te pozwalają sprowadzić problem do dwuwymiarowego zadania przewodnictwa ciepła,

Przykładzik modelowania przekroju poprzecznego z otworem 2

$$c \left(\frac{\partial^2 q(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q(x, y)}{\partial y^2} \right) = -f(x, y),$$

- ▶ $q(x, y)$ – temperatura w pkt. x, y ,
- ▶ $f(x, y)$ – wewnętrzne źródła ciepła – modelują płynną część pasma (krzepnięcia nie modelujemy),
- ▶ $(x, y) \in \Omega$ – otwarty obszar Ω – prostokąt z okrągłym wycięciem Γ .

Przykładzik modelowania przekroju poprzecznego z otworem 3

Warunki brzegowe

1. na zewnętrznym brzegu ($\partial\Omega$) – I rodzaju
 $q|_{\partial\Omega} = \text{const}$,
2. na granicy otworu $\partial\Gamma$ – warunki III rodz.:

$$\vec{n} \cdot \text{grad } q|_{\partial\Gamma} = \alpha (q|_{\partial\Gamma} - q_{int}), \quad (4)$$

\vec{n} – wektor normalny do brzegu
wewnętrznego obszaru $\partial\Gamma$, q_{int} jest
wewnętrzną temperaturą otworu
(pustki).

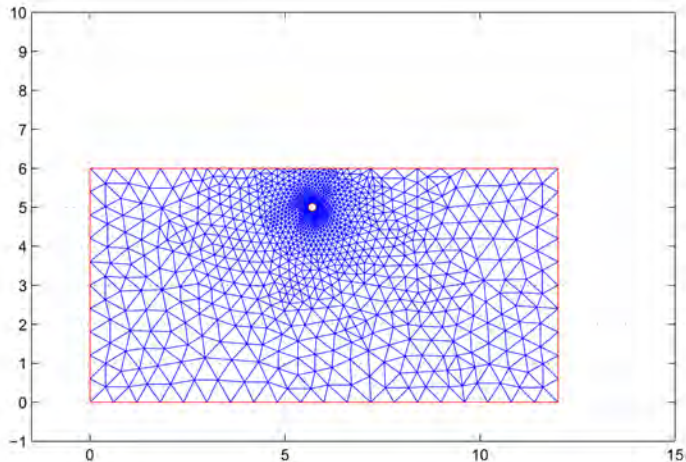
Przykładzik modelowania przekroju poprzecznego z otworem 4

Cel modelowania – zbadać, czy istnienie otworu wewnątrz da "widzialne" kamerą zmiany na powierzchni pasma miedzi.

- ▶ Metoda elementów skończonych,
- ▶ Siatka nierównomierna z 2228 elementów trójkatnych,
- ▶ rozwiązanie obliczano w 1159 punktach.

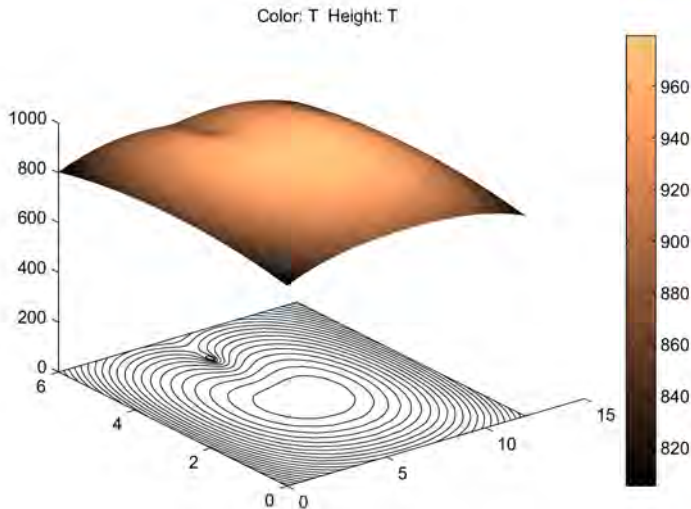
Korzystano z procedur Matlab'a do uformowania i rozwiązywania układów równań liniowych, metody elementów skończonych. Zwykły PC-et, czas obliczeń – niezauważalny.

Siatka elementów skończonych



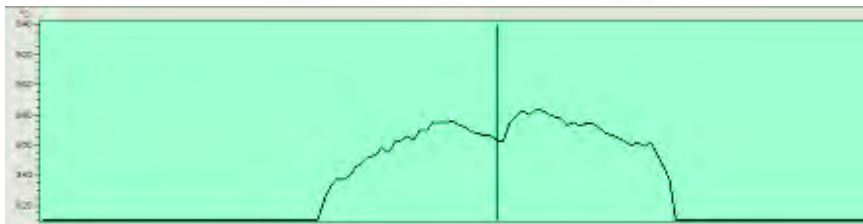
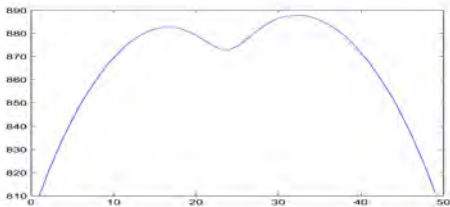
dopasowana do geometrii z otworem.

Rozkład temperatury na powierzchni.



i poziomicie temperatury.

Przekrój rozkładu temperatury na powierzchni model i przekrój z termowizji



Wnioski z przykładu

- ▶ **Widoczne obniżenie temperatury, (otwór – kilka mm) – kamera też "zobaczy".**
- ▶ Model jakościowo \simeq rzeczywistości.
- ▶ Wnioski ogólniejsze:
- ▶ Aktualny stan wiedzy pozwala na:
 - ▶ skuteczne modelowanie i rozwiązywanie r.r.cz.
 - ▶ rozwiązywanie dużych problemów optymalizacji.

Wnioski z przykładu

- ▶ Widoczne obniżenie temperatury, (otwór – kilka mm) – kamera też "zobaczy".
- ▶ **Model jakościowo \simeq rzeczywistości.**
- ▶ Wnioski ogólniejsze:
- ▶ Aktualny stan wiedzy pozwala na:
 - ▶ skuteczne modelowanie i rozwiązywanie r.r.cz.
 - ▶ rozwiązywanie dużych problemów optymalizacji.

Wnioski z przykładu

- ▶ Widoczne obniżenie temperatury, (otwór – kilka mm) – kamera też "zobaczy".
- ▶ Model jakościowo \simeq rzeczywistości.
- ▶ **Wnioski ogólniejsze:**
- ▶ Aktualny stan wiedzy pozwala na:
 - ▶ skuteczne modelowanie i rozwiązywanie r.r.cz.
 - ▶ rozwiązywanie dużych problemów optymalizacji.

Wnioski z przykładu

- ▶ Widoczne obniżenie temperatury, (otwór – kilka mm) – kamera też "zobaczy".
- ▶ Model jakościowo \simeq rzeczywistości.
- ▶ Wnioski ogólniejsze:
- ▶ **Aktualny stan wiedzy pozwala na:**
 - ▶ skuteczne modelowanie i rozwiązywanie r.r.cz.
 - ▶ rozwiązywanie dużych problemów optymalizacji.

Wnioski z przykładu

- ▶ Widoczne obniżenie temperatury, (otwór – kilka mm) – kamera też "zobaczy".
- ▶ Model jakościowo \simeq rzeczywistości.
- ▶ Wnioski ogólniejsze:
- ▶ Aktualny stan wiedzy pozwala na:
 - ▶ **skuteczne modelowanie i rozwiązywanie r.r.cz.**
 - ▶ rozwiązywanie dużych problemów optymalizacji.

Wnioski z przykładu

- ▶ Widoczne obniżenie temperatury, (otwór – kilka mm) – kamera też "zobaczy".
- ▶ Model jakościowo \simeq rzeczywistości.
- ▶ Wnioski ogólniejsze:
- ▶ Aktualny stan wiedzy pozwala na:
 - ▶ skuteczne modelowanie i rozwiązywanie r.r.cz.
 - ▶ **rozwiązywanie dużych problemów optymalizacji.**

Wnioski końcowe

- ▶ **Dalszych refleksji i badań wymagają sposoby współpracy między solverami r.r.cz. i optymalizacji.**
- ▶ Filter SQP jest obiecującą techniką poszukiwania sterowań optymalnych dla sterowania DPS.
- ▶ Nowe środki techniczne pozwalają na:
- ▶ formułowanie nowych (często łatwiejszych) zadań sterowania, identyfikacji i diagnostyki DPS,

Wnioski końcowe

- ▶ Dalszych refleksji i badań wymagają sposoby współpracy między solverami r.r.cz. i optymalizacji.
- ▶ **Filter SQP jest obiecującą techniką poszukiwania sterowań optymalnych dla sterowania DPS.**
- ▶ Nowe środki techniczne pozwalają na:
- ▶ formułowanie nowych (często łatwiejszych) zadań sterowania, identyfikacji i diagnostyki DPS,

Wnioski końcowe

- ▶ Dalszych refleksji i badań wymagają sposoby współpracy między solverami r.r.cz. i optymalizacji.
- ▶ Filter SQP jest obiecującą techniką poszukiwania sterowań optymalnych dla sterowania DPS.
- ▶ **Nowe środki techniczne pozwalają na:**
 - ▶ formułowanie nowych (często łatwiejszych) zadań sterowania, identyfikacji i diagnostyki DPS,

Wnioski końcowe

- ▶ Dalszych refleksji i badań wymagają sposoby współpracy między solverami r.r.cz. i optymalizacji.
- ▶ Filter SQP jest obiecującą techniką poszukiwania sterowań optymalnych dla sterowania DPS.
- ▶ Nowe środki techniczne pozwalają na:
 - ▶ **formułowanie nowych (często łatwiejszych) zadań sterowania, identyfikacji i diagnostyki DPS,**

Wnioski końcowe 2

- ▶ **śmielsze próby formułowania zadań sterowania on-line DPS,**
- ▶ korzystanie z wymiany informacji między czujnikami.
- ▶ Dzisiejsze seminarium pokazuje, że w Polsce jest duży potencjał badawczy w zakresie modelowania, identyfikacji, sterowania systemów DPS i związanych z nimi: systemów nD oraz sieci neuronowych (komórkowych i RBF).
- ▶ Można zatem myśleć o dużym projekcie badawczym do NCB.

Wnioski końcowe 2

- ▶ śmielsze próby formułowania zadań sterowania on-line DPS,
- ▶ **korzystanie z wymiany informacji między czujnikami.**
- ▶ Dzisiejsze seminarium pokazuje, że w Polsce jest duży potencjał badawczy w zakresie modelowania, identyfikacji, sterowania systemów DPS i związanych z nimi: systemów nD oraz sieci neuronowych (komórkowych i RBF).
- ▶ Można zatem myśleć o dużym projekcie badawczym do NCB.

Wnioski końcowe 2

- ▶ śmielsze próby formułowania zadań sterowania on-line DPS,
- ▶ korzystanie z wymiany informacji między czujnikami.
- ▶ **Dzisiejsze seminarium pokazuje, że w Polsce jest duży potencjał badawczy w zakresie modelowania, identyfikacji, sterowania systemów DPS i związanych z nimi: systemów nD oraz sieci neuronowych (komórkowych i RBF).**
- ▶ Można zatem myśleć o dużym projekcie badawczym do NCB.






Wnioski końcowe 2

- ▶ śmielsze próby formułowania zadań sterowania on-line DPS,
- ▶ korzystanie z wymiany informacji między czujnikami.
- ▶ Dzisiejsze seminarium pokazuje, że w Polsce jest duży potencjał badawczy w zakresie modelowania, identyfikacji, sterowania systemów DPS i związanych z nimi: systemów nD oraz sieci neuronowych (komórkowych i RBF).
- ▶ **Można zatem myśleć o dużym projekcie badawczym do NCB.**

Podziękowania

- ▶ Serdecznie dziękujemy Kolegom:
za zaproszenie,
- ▶ za miłą atmosferę i znakomitą
organizację,
- ▶ a wszystkim Państwu za uwagę.



-  CHARLES AUDET AND J. E. DENNIS, JR., A PATTERN SEARCH FILTER METHOD FOR NONLINEAR PROGRAMMING WITHOUT DERIVATIVES SIAM J. OPTIM. Vol. 14, No. 4, pp. 980–1010
-  Choong Ming Chin, Roger Fletcher, On the global convergence of an SLP–filter algorithm that takes EQP steps, Math. Program., Ser. A 96: 161–177 (2003).
-  Alfio Borze, Space-Time Multigrid Methods for Solving Unsteady Optimal Control Problems,
-  Ulbrich S., Generalized SQP Methods with “Parareal” Time-Domain Decomposition for Time-Dependent PDE-Constrained Optimization.
-  Martin A. Grepl et al, Certified Rapid Solution of Partial Differential Equations for Real-Time Parameter Estimation and Optimization,



II Fast PDE-Constrained Optimization Solvers, Eds L. T.

Biegler et al, Real-Time PDE-Constrained Optimization, 2007
SIAM.



**Ucinski D. Optimal Measurement
Methods for Distributed Parameter
System Identification CRC 2005**



**Math. Program., Ser. A 91: 239–269
(2002) Roger Fletcher · Sven Leyffer
Nonlinear programming without a penalty
function**