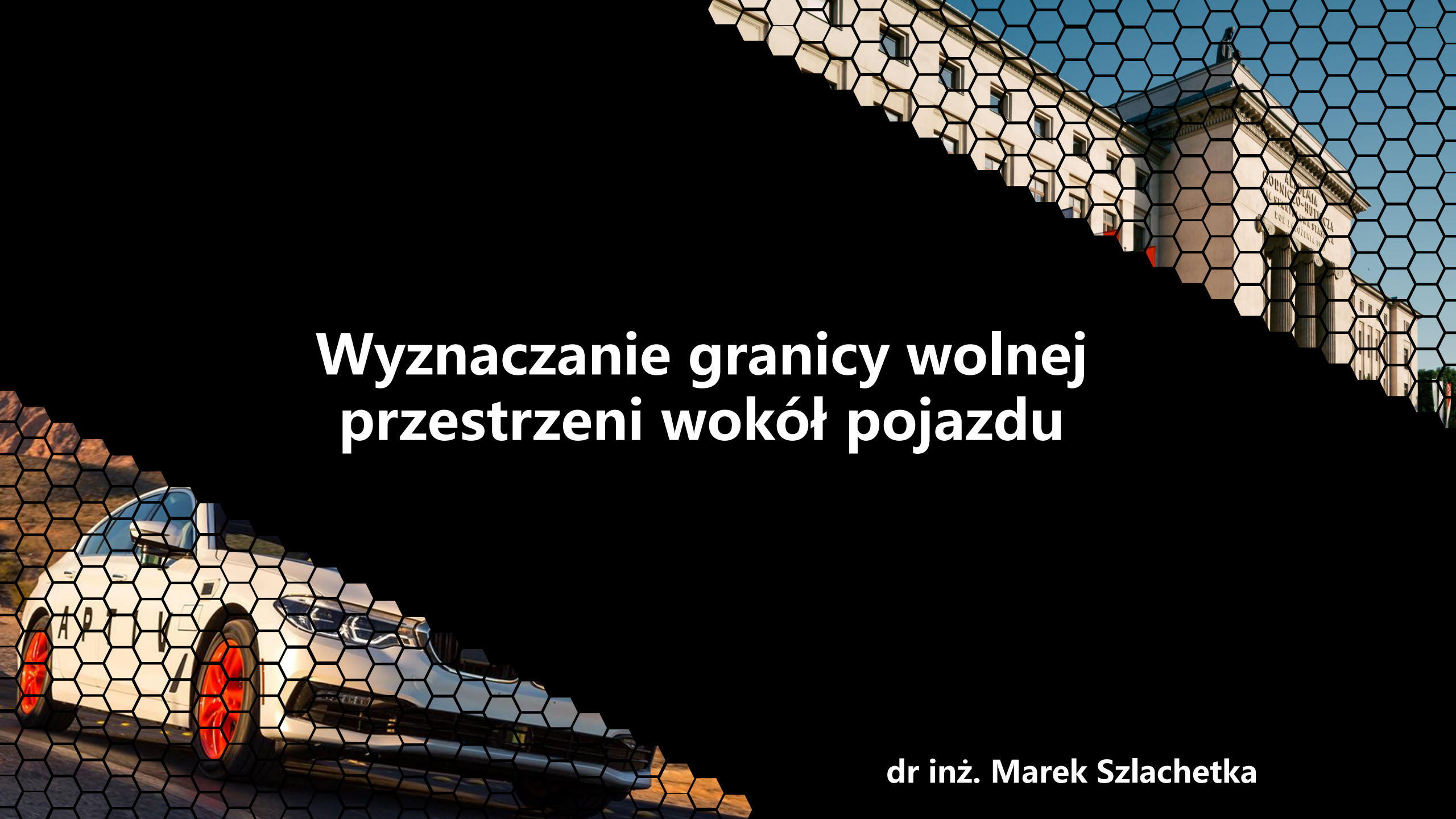




Wyznaczanie granicy wolnej przestrzeni wokół pojazdu

dr inż. Marek Szlachetka

Agenda

- Wprowadzenie
 - Dlaczego ?
 - System samochodowy
 - Modele w systemach percepcji
- Algorytm wyznaczania granicy wolnej przestrzeni
 - Opis
 - Testy i weryfikacja
- Q&A

Dlaczego ?

Bezpieczeństwo

***Wymogi bezpieczeństwa (UE 2019/2144)**

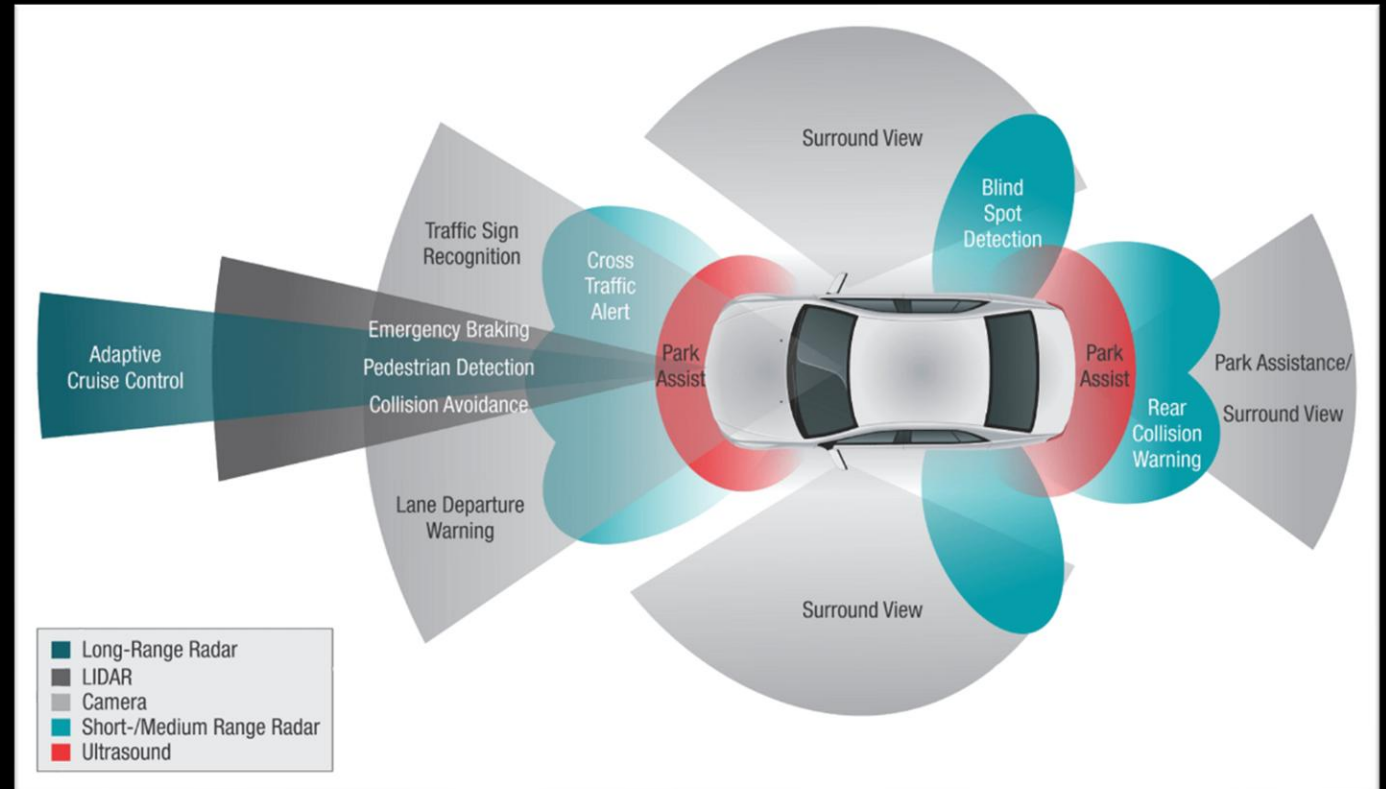
System samochodowy

Funkcje
bezpieczeństwa

Planowanie
ruchu

Percepcja

Czujniki



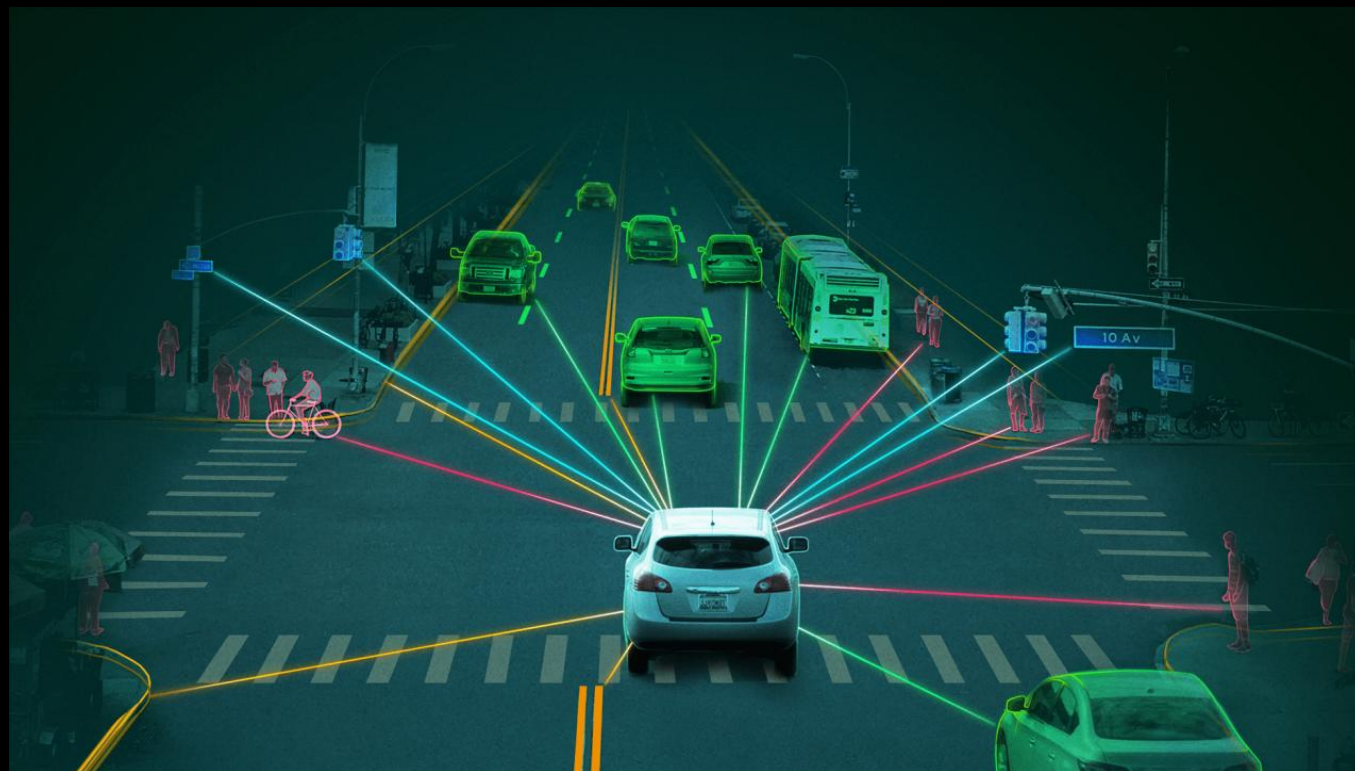
System samochodowy

Funkcje
bezpieczeństwa

Planowanie
ruchu

Percepcja

Czujniki



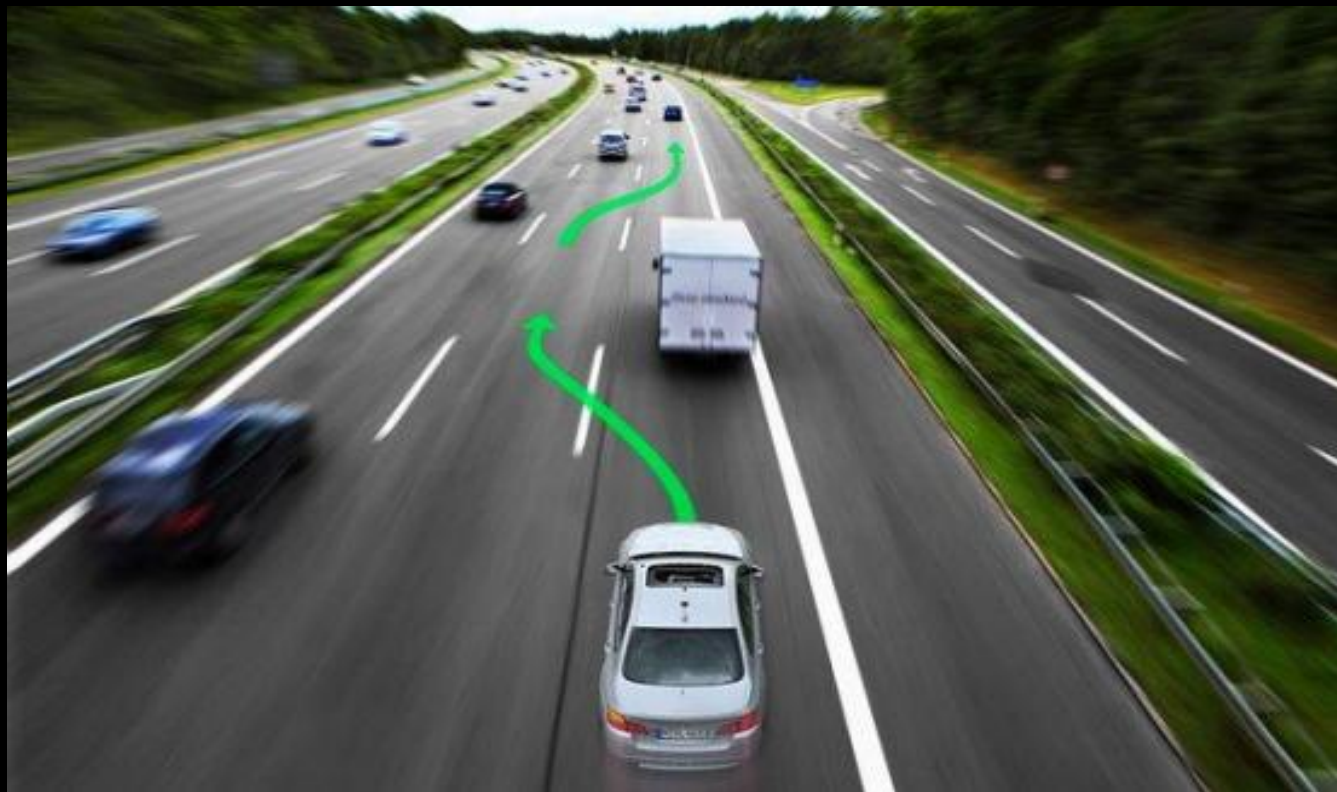
System samochodowy

Funkcje
bezpieczeństwa

Planowanie
ruchu

Percepcja

Czujniki



Percepcja

modele matematyczne

Środowisko dynamiczne

Środowisko stacjonarne

Parametryczne

- Prymitywne kształty
- Kontury

Nieparametryczne

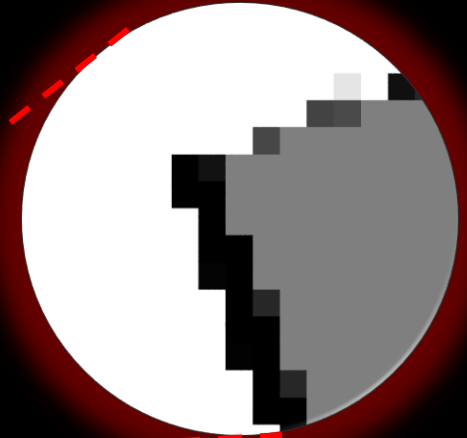
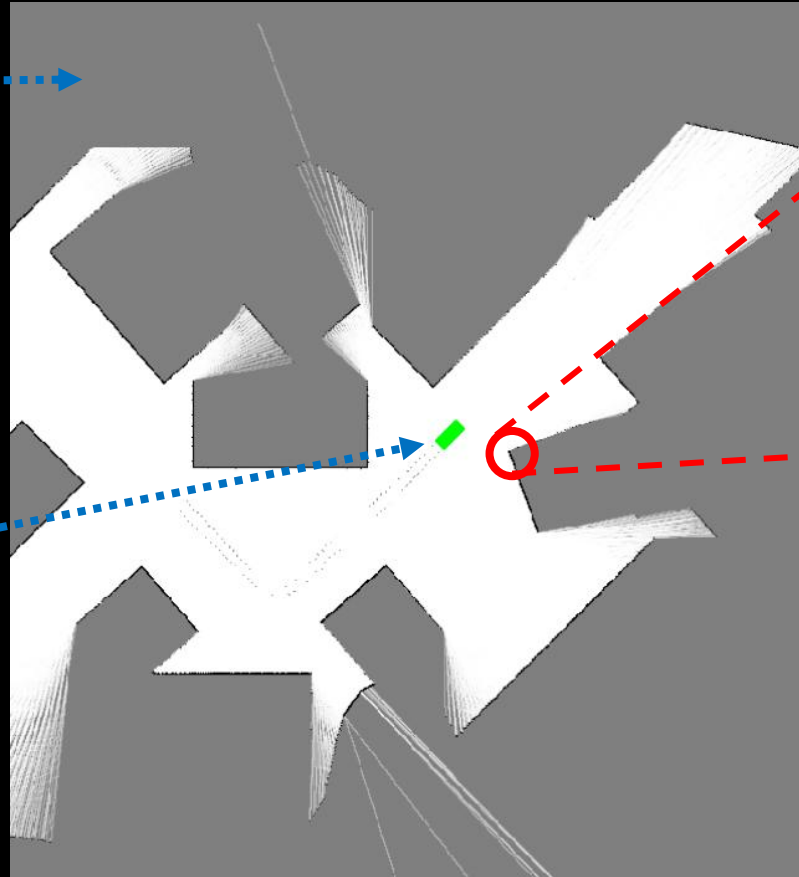
- Siatki (grid maps)
 - 1D
 - 2D
 - 2.5D
 - 3D

Modelowanie środowiska

(siatka zajętości – ang. occupancy grid)

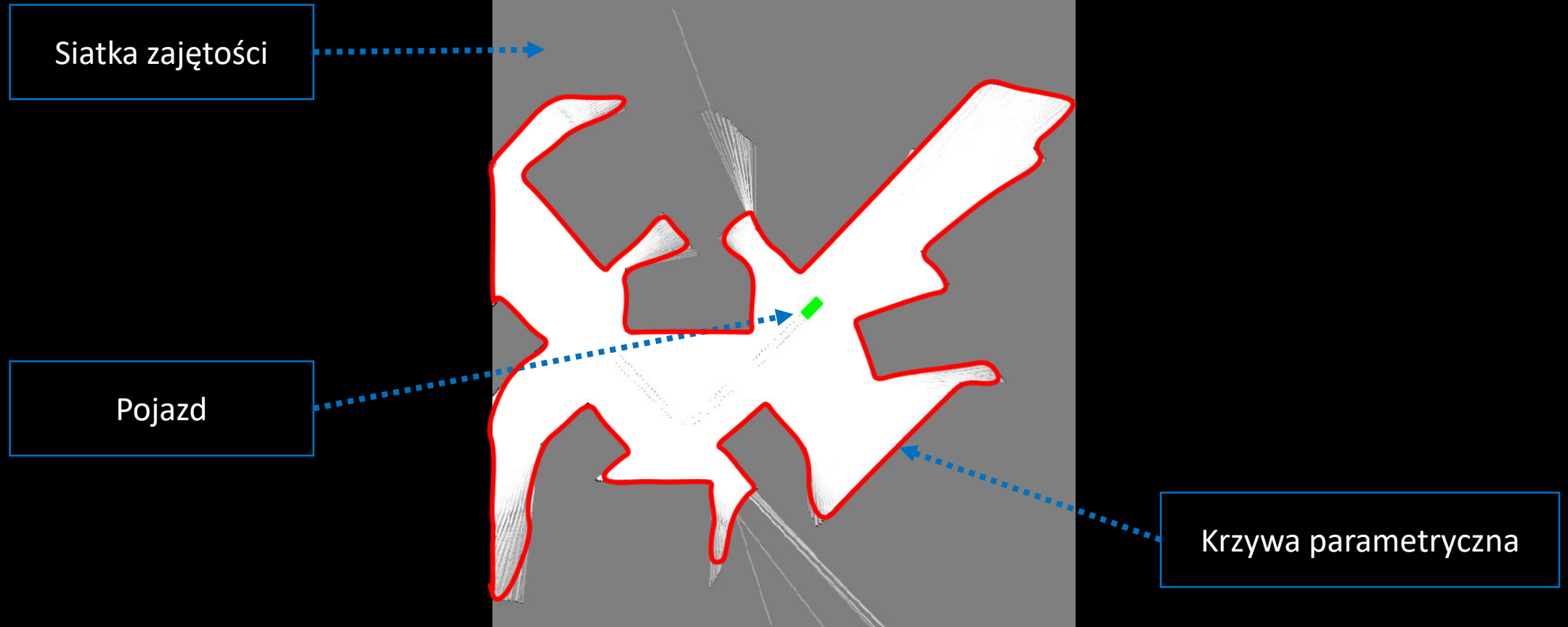
Siatka zajętości

Pojazd

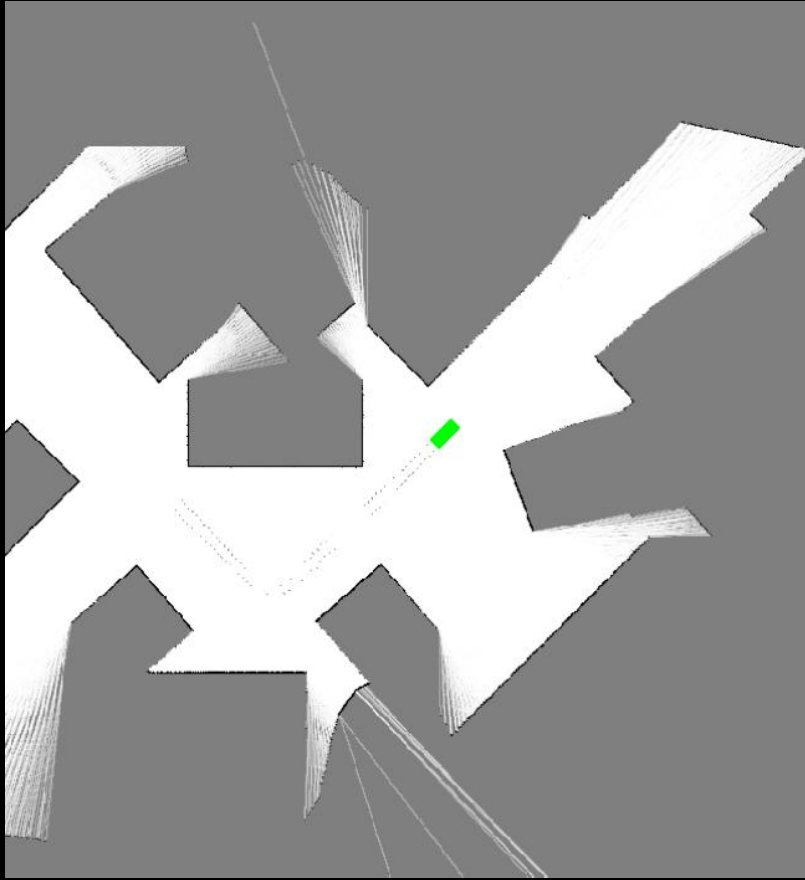


Modelowanie środowiska

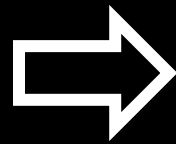
(krzywa parametryczna)



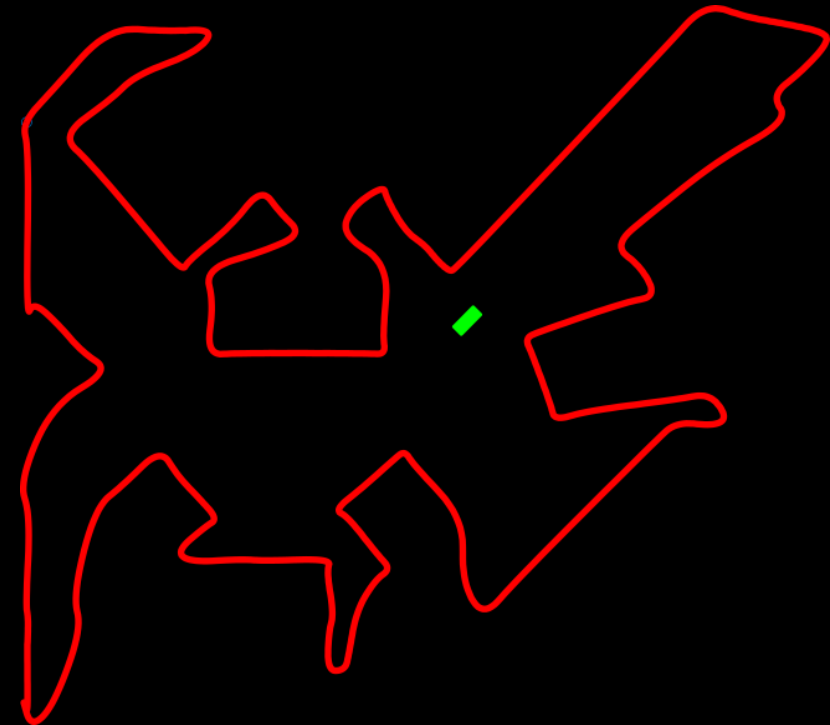
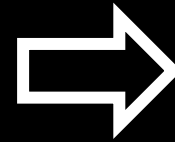
Wyznaczenie granicy wolnej przestrzeni



Siatka zajętości + pojazd



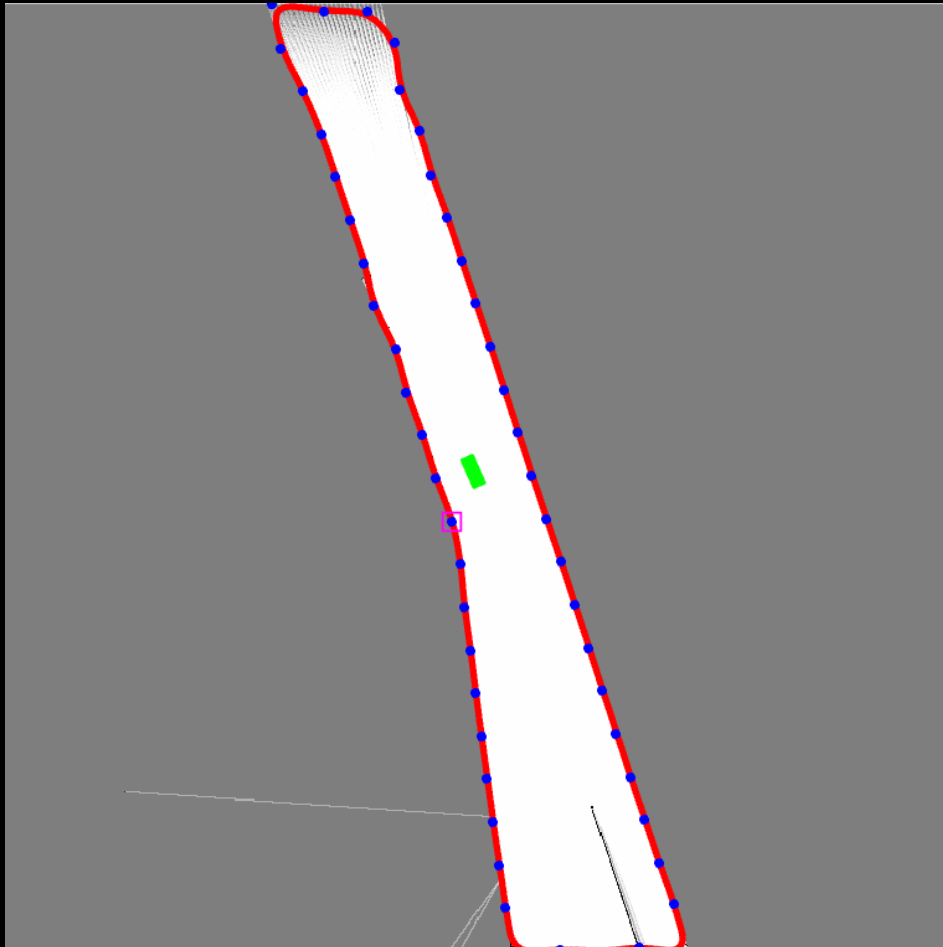
Algorytm



Krzywa parametryczna

Punkt wyjścia - algorytm referencyjny

(PFS – Parametric Free Space)



Model

Dwuwymiarowa krzywa parametryczna złożona z jednowymiarowych krzywych sklejanych typu B-Spline stopnia drugiego

Cechy szczególne

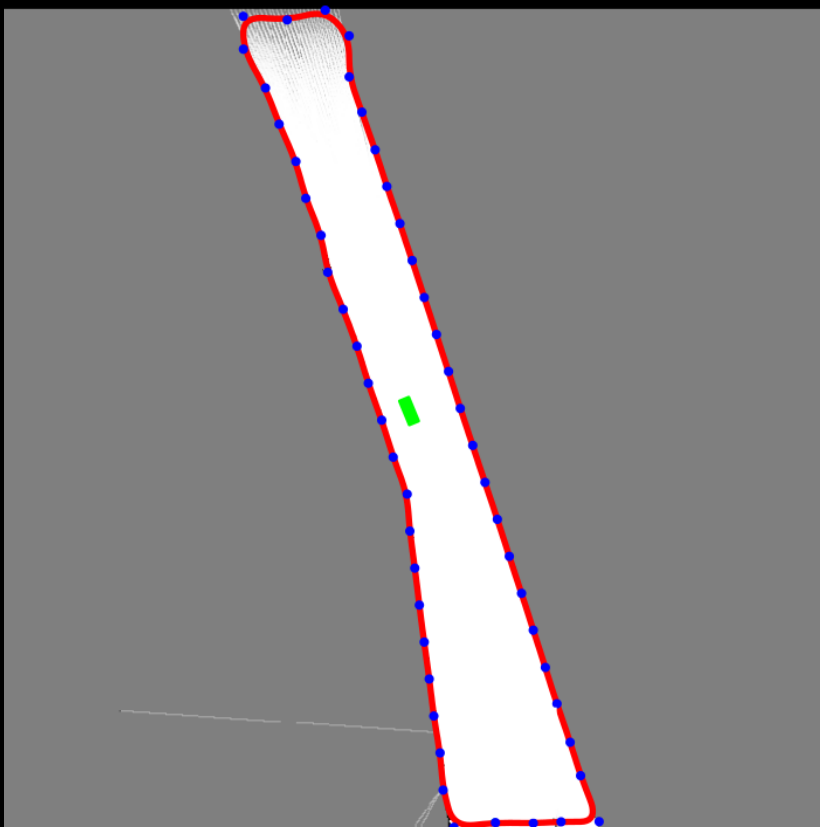
- Stała liczba punktów kontrolnych
- Równomierne rozłożenie punktów kontrolnych wzdłuż krzywej

Uwagi ogólne

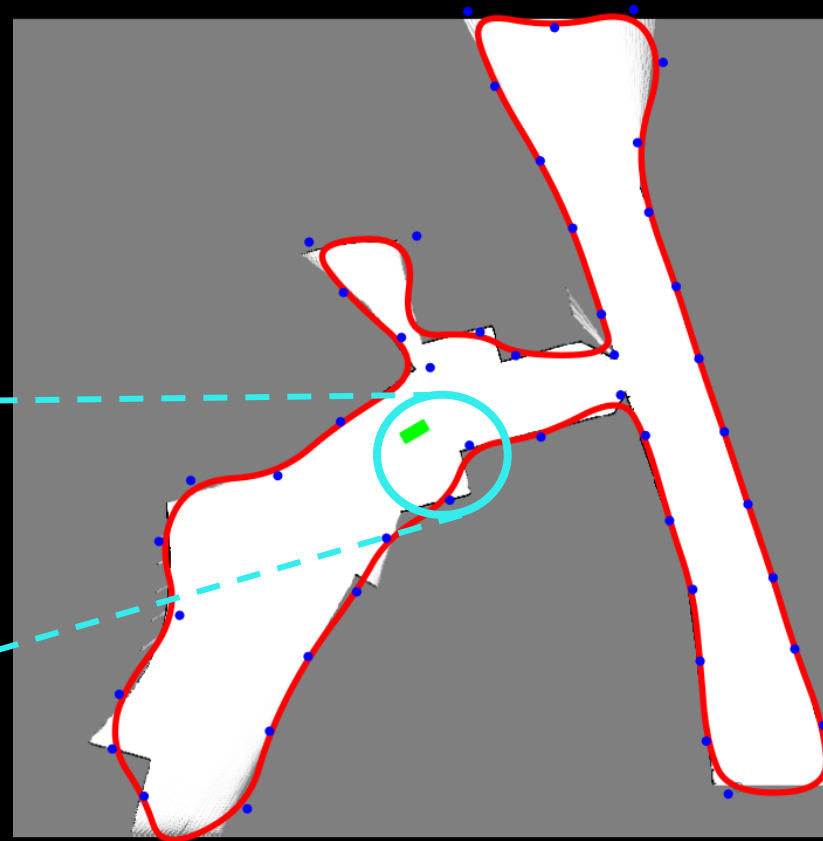
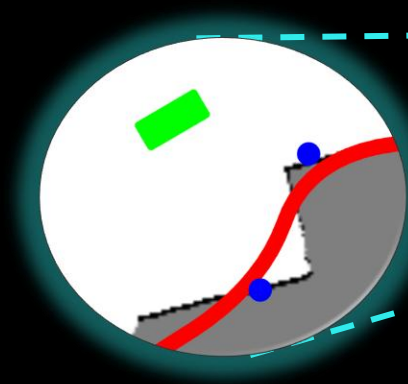
- Bardziej przypomina jednokrokową aproksymację niż śledzenie obiektów stacjonarnych w czasie
- Brak możliwości dynamicznej zmiany ilości punktów kontrolnych oraz ich pozycji

Punkt wyjścia - algorytm referencyjny

(PFS – Parametric Free Space)



Prosty kształt

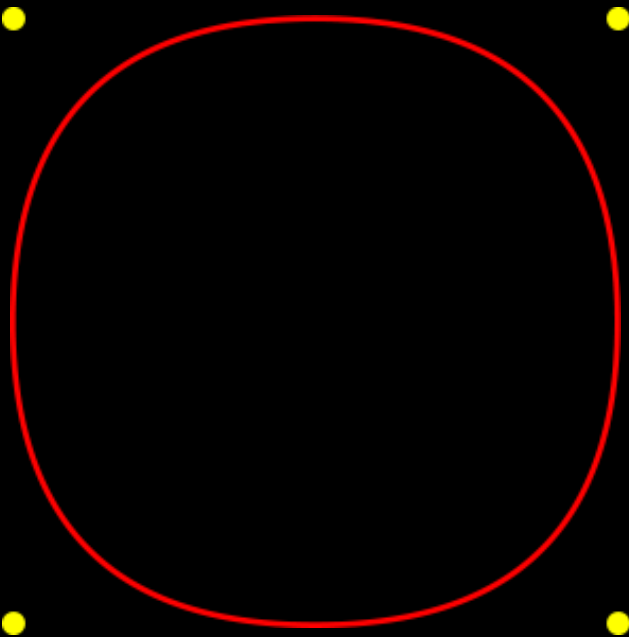


Złożony kształt

Algorytm wyznaczania granicy wolnej przestrzeni

Model matematyczny

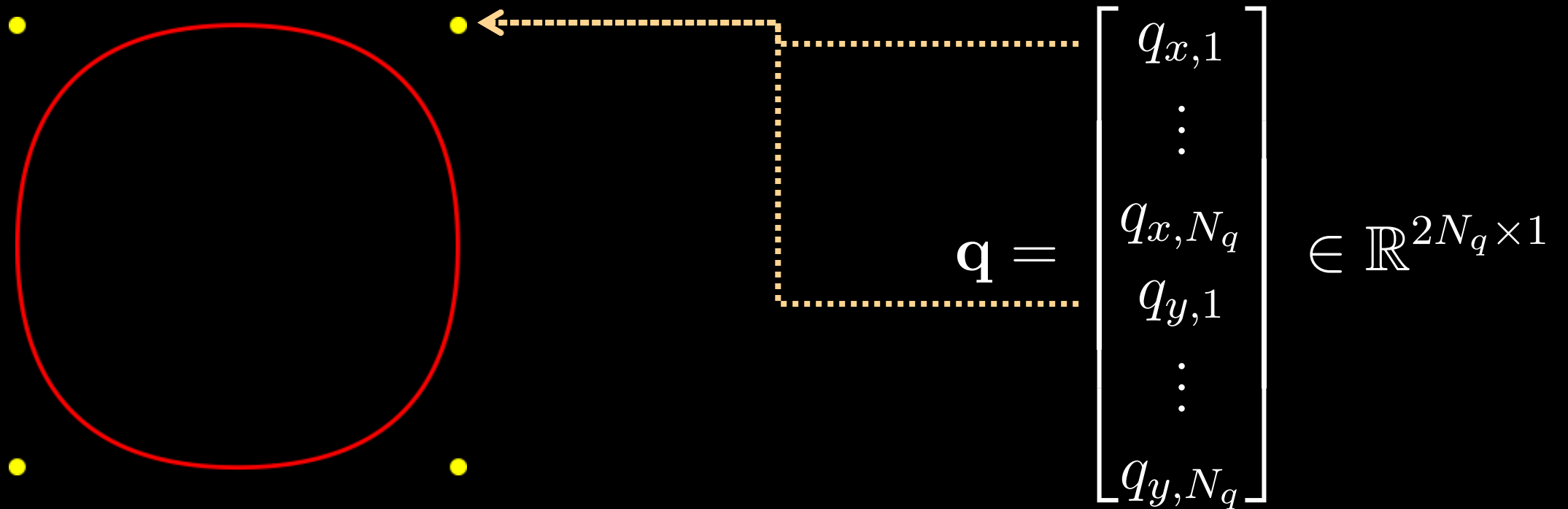
Dwuwymiarowa zamknięta krzywa parametryczna złożona z jednowymiarowych krzywych sklejanych typu B-Spline stopnia 2



$$\mathbf{r}(s) = \begin{bmatrix} r_x(s) \\ r_y(s) \end{bmatrix} = \mathbf{H}(s)\mathbf{q} \in \mathbb{R}^2$$
$$s \in \langle 0, 1 \rangle$$

Model matematyczny

(wektor stanu)



$$\mathbf{r}(s) = \begin{bmatrix} r_x(s) \\ r_y(s) \end{bmatrix} = \mathbf{H}(s) \mathbf{q} \in \mathbb{R}^2$$

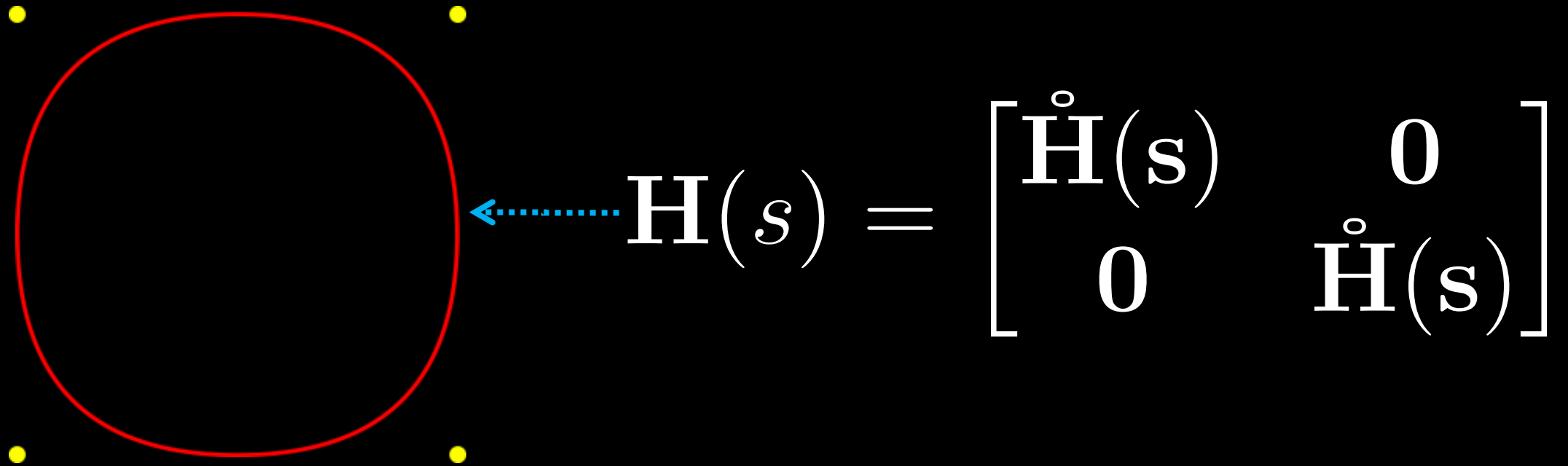
N_q - number of control points

$q_{x,i}$ - longitudinal position of the i-th control point

$q_{y,i}$ - lateral position of the i-th control point

Model matematyczny

(macierz obserwacji)

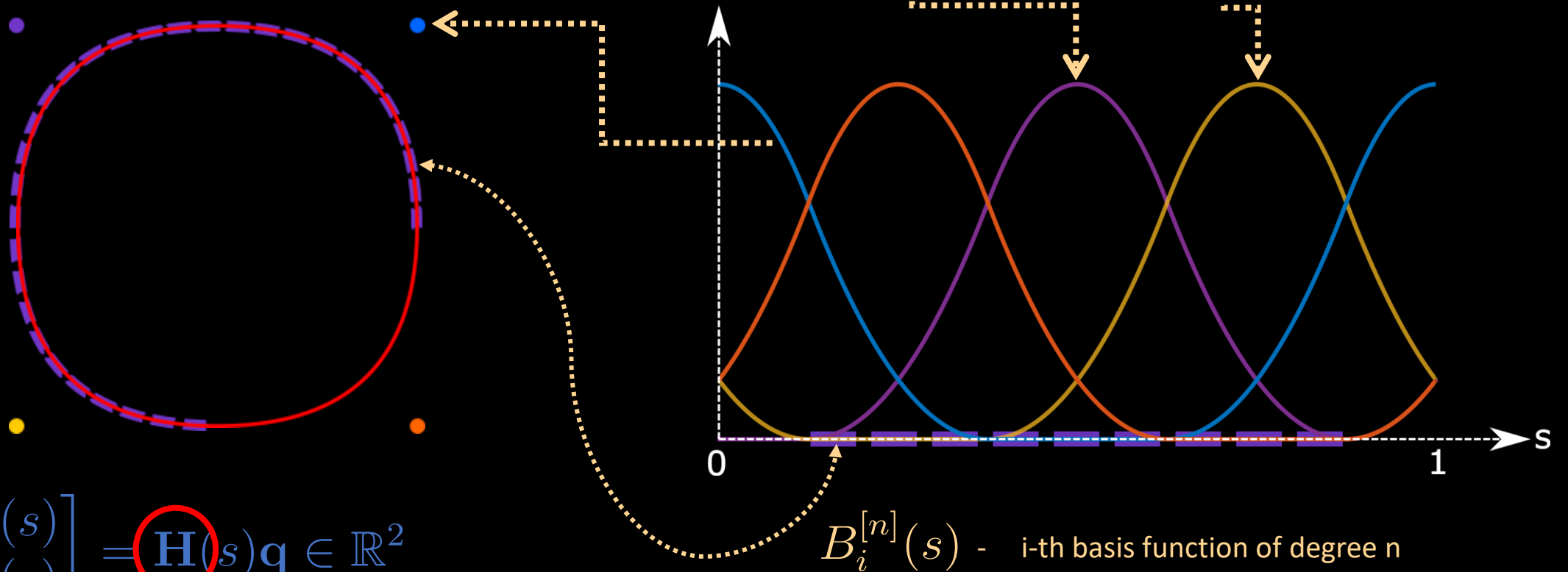


$$\mathbf{r}(s) = \begin{bmatrix} r_x(s) \\ r_y(s) \end{bmatrix} = \mathbf{H}(s) \mathbf{q} \in \mathbb{R}^2$$

Model matematyczny

(zamknięta jednorodna okresowa krzywa B-sklejana)

$$\dot{\mathbf{H}}(\mathbf{s}) = \begin{bmatrix} B_1^{[n]}(s) & B_2^{[n]}(s) & \cdots & B_{N_q-1}^{[n]}(s) & B_{N_q}^{[n]}(s) \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{r}(s) = \begin{bmatrix} r_x(s) \\ r_y(s) \end{bmatrix} = \mathbf{H}(s)\mathbf{q} \in \mathbb{R}^2$$

Model matematyczny

(funkcje bazowe - wzór)

$$B_i^{[n]}(s) = B^{[n]}(\hat{s} - 1) + B^{[n]}(\hat{s}) + B^{[n]}(\hat{s} + 1)$$

$$\hat{s} = s - s_i$$

$$s_i = \frac{i - 1}{N_q}$$

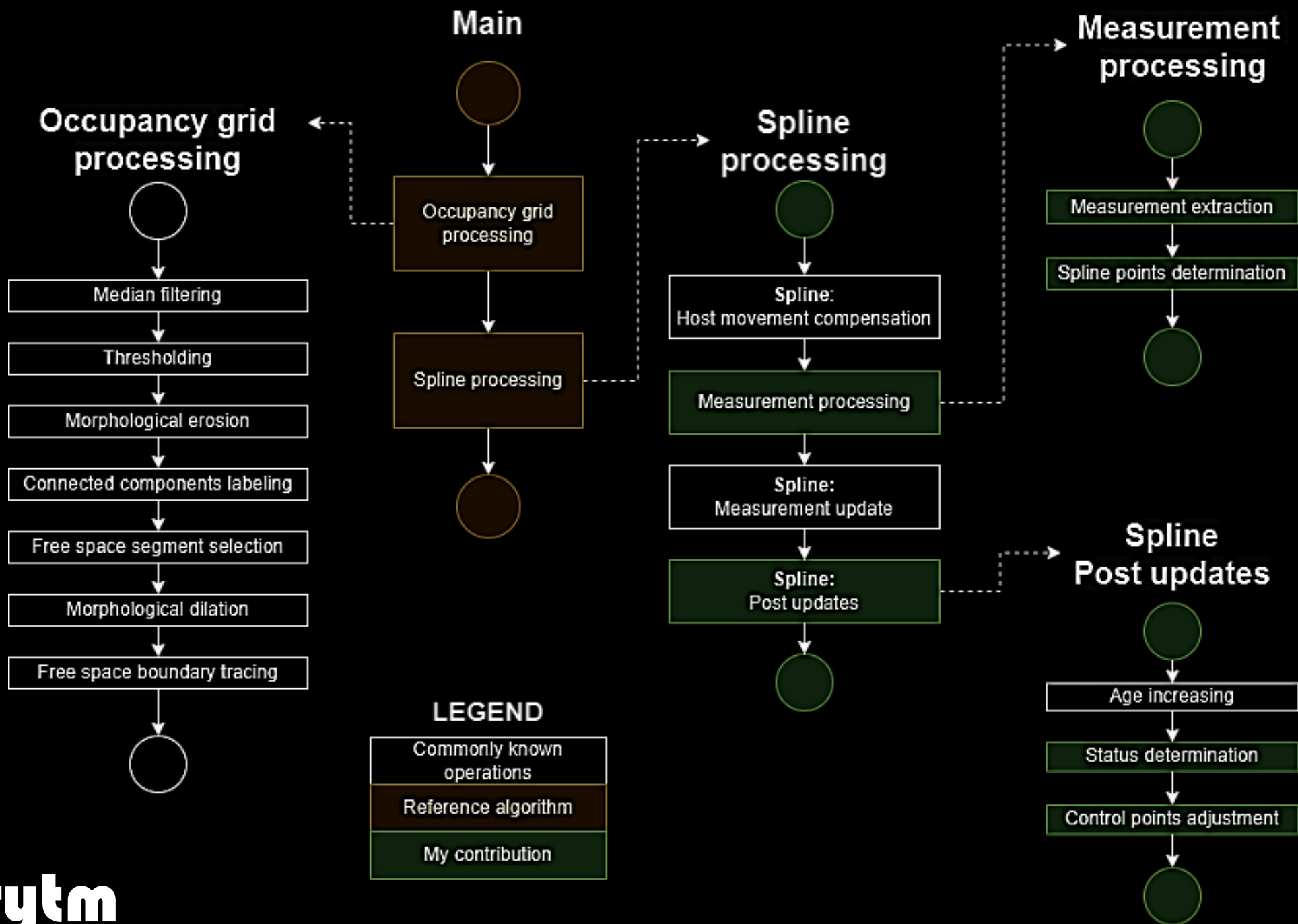
$$B^{[n]}(s) = \hat{B}_{1,n}^{[n]}(s)$$

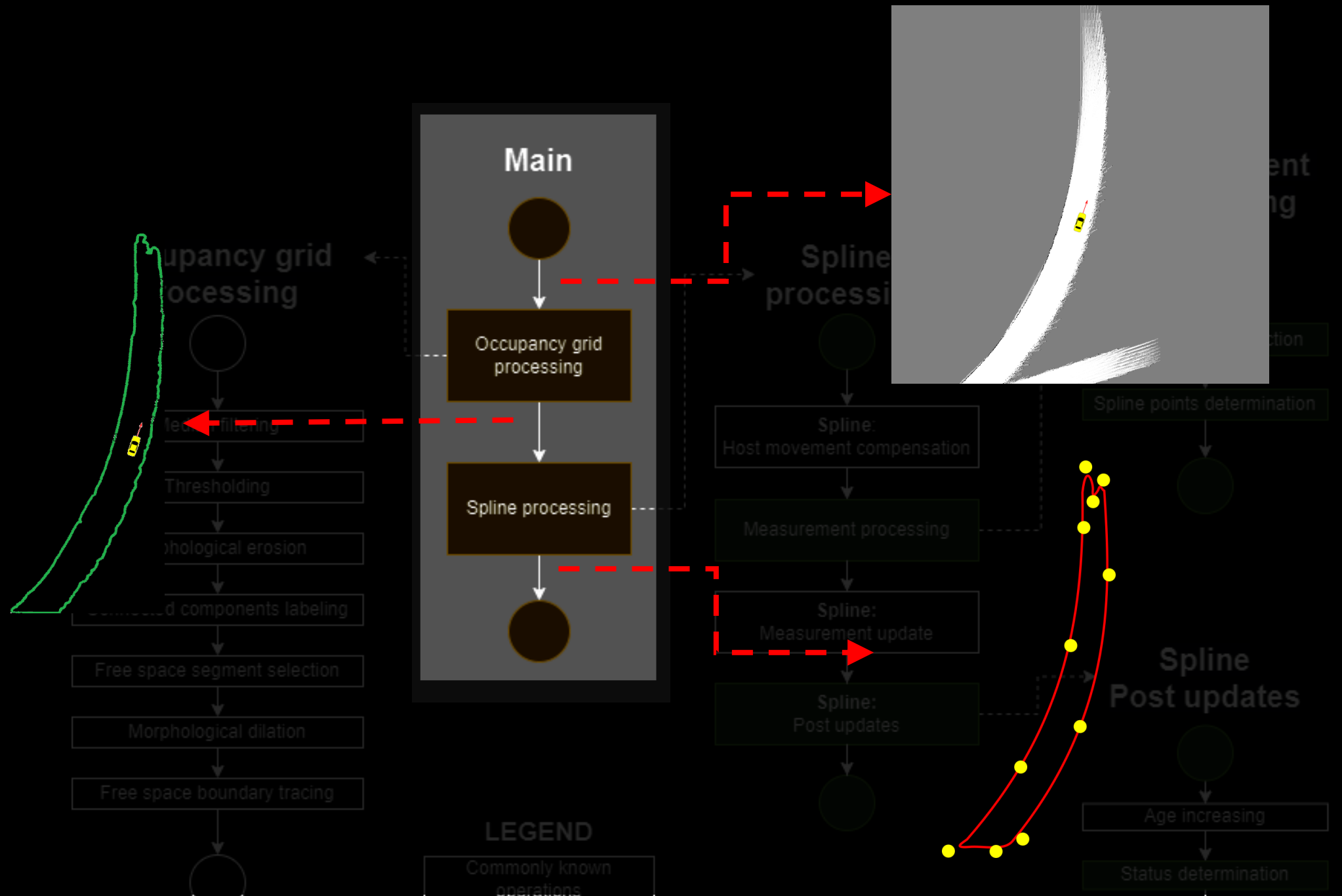
$$D = \frac{n + 1}{2}$$

$$\hat{B}_{i,k}^{[n]}(s) = \frac{sN_q + D - i + 1}{k} \hat{B}_{i,k-1}^{[n]}(s) + \frac{i + k - sN_q - D}{k} \hat{B}_{i+1,k-1}^{[n]}(s)$$

$$\hat{B}_{i,0}^{[n]}(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{2i-n-3}{2N_q} \leq s < \frac{2i-n-1}{2N_q} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

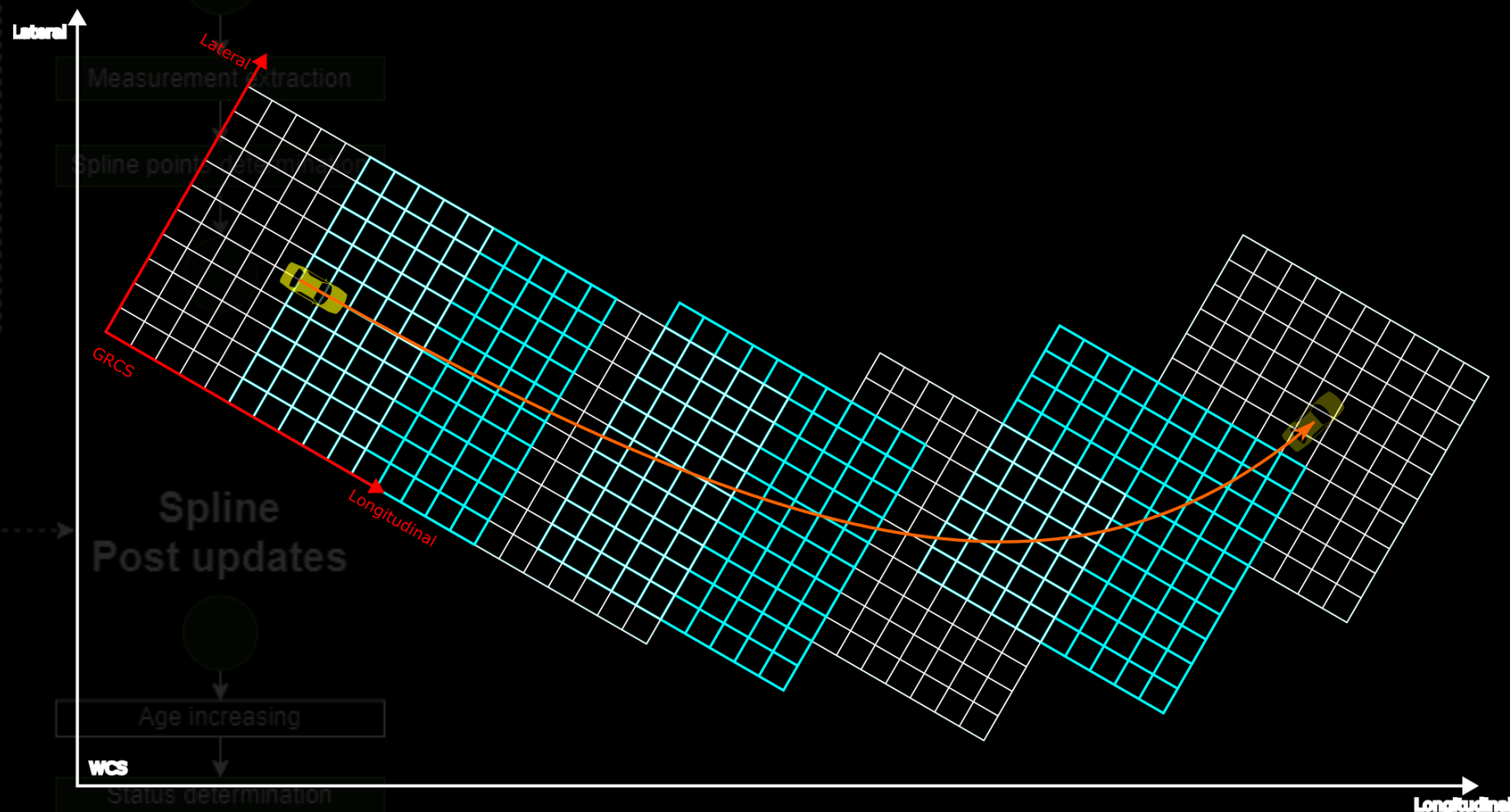
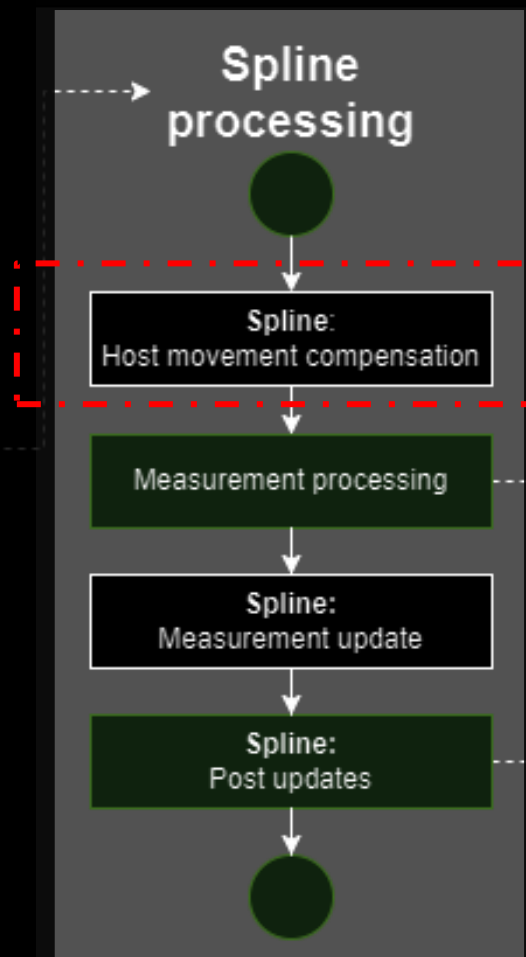
$$\mathbf{r}(s) = \begin{bmatrix} r_x(s) \\ r_y(s) \end{bmatrix} = \mathbf{H}(s) \mathbf{q} \in \mathbb{R}^2$$





Kompensacja ruchu pojazdu

(zaczepienie układu współrzędnych)



Kompensacja ruchu pojazdu

(krok predykcji - wzór)

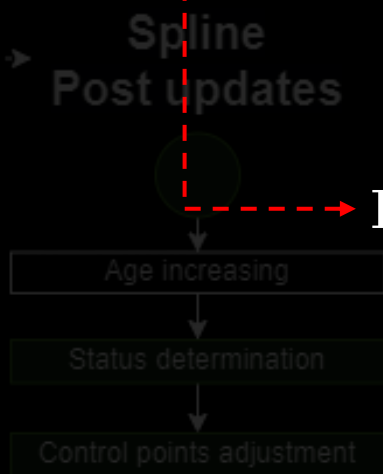
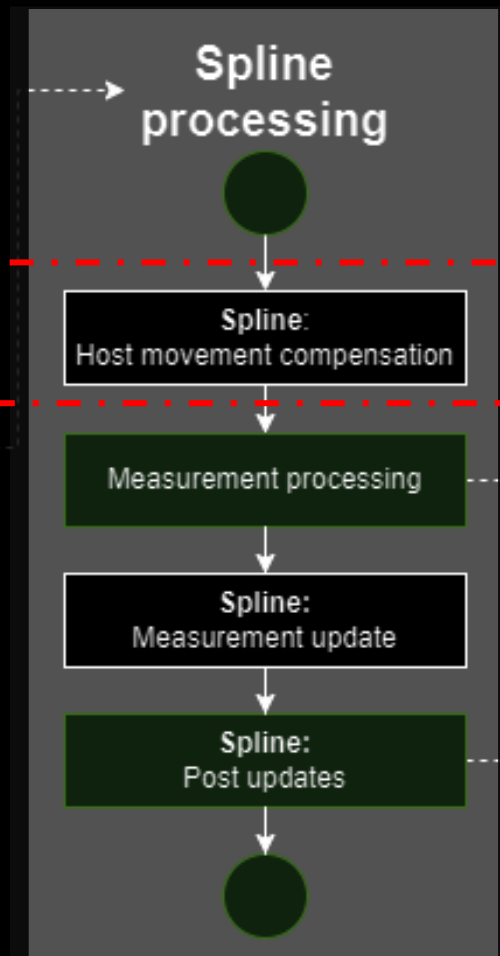
$$\hat{\mathbf{q}}_{k|k-1} = \mathbf{q}_{k-1|k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{k|k-1} = \mathbf{P}_{k-1|k-1} + \mathbf{Q}_k$$

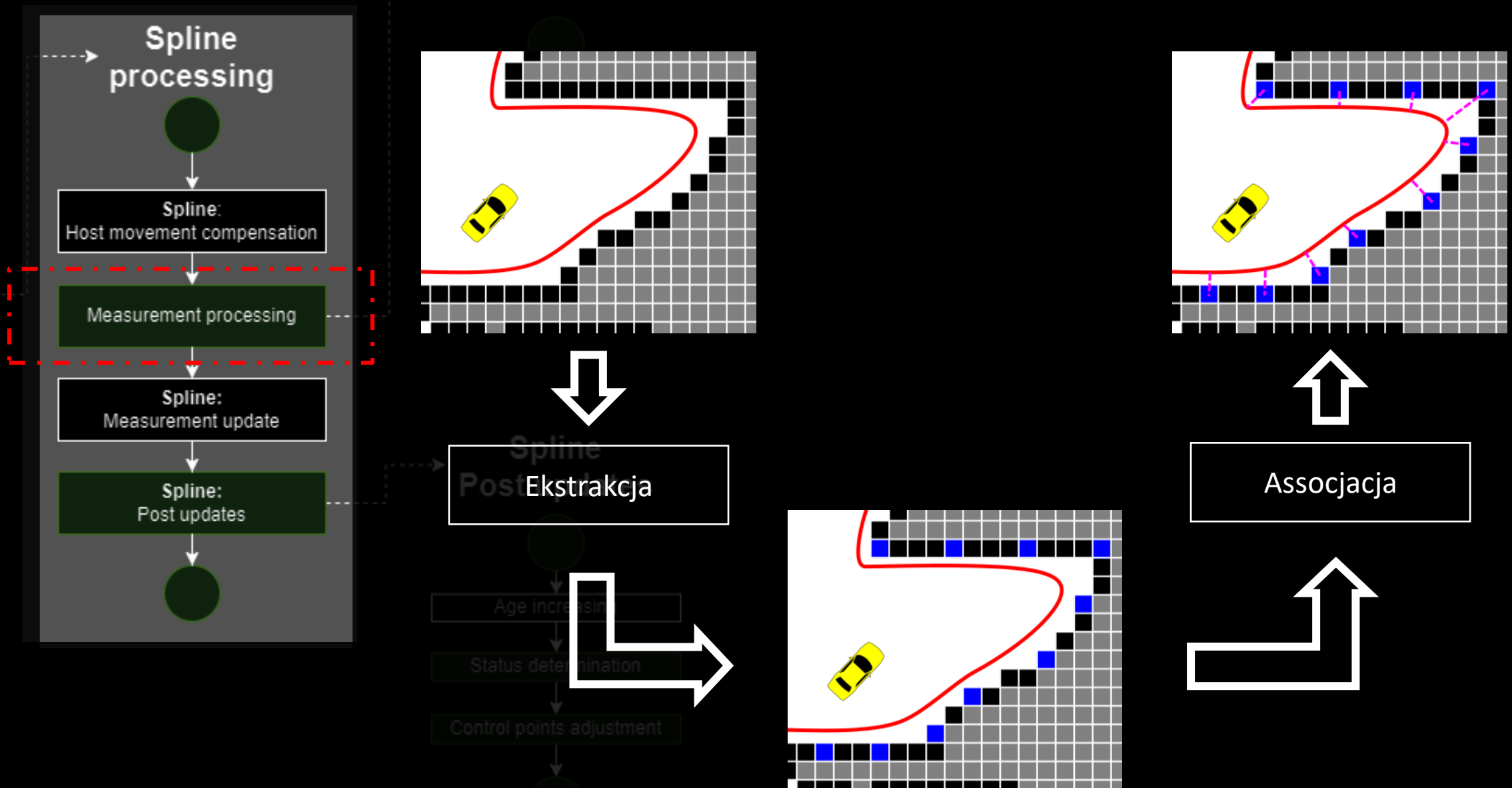
$$\mathbf{u}_k = \begin{bmatrix} u_{x,k} \\ u_{y,k} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \Delta t & 0 \\ \Delta t & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \Delta t \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix}_{2N_q \times 2}$$

- $\mathbf{B}$ - input matrix (elapsed time)
- $\mathbf{u}_k$ - control vector (host car speed)
- $\mathbf{P}_k$ - covariance matrix
- $\mathbf{Q}_k$ - process noise matrix

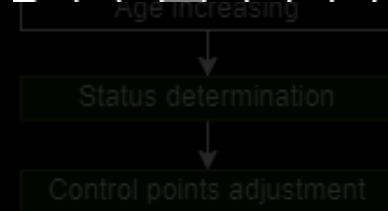
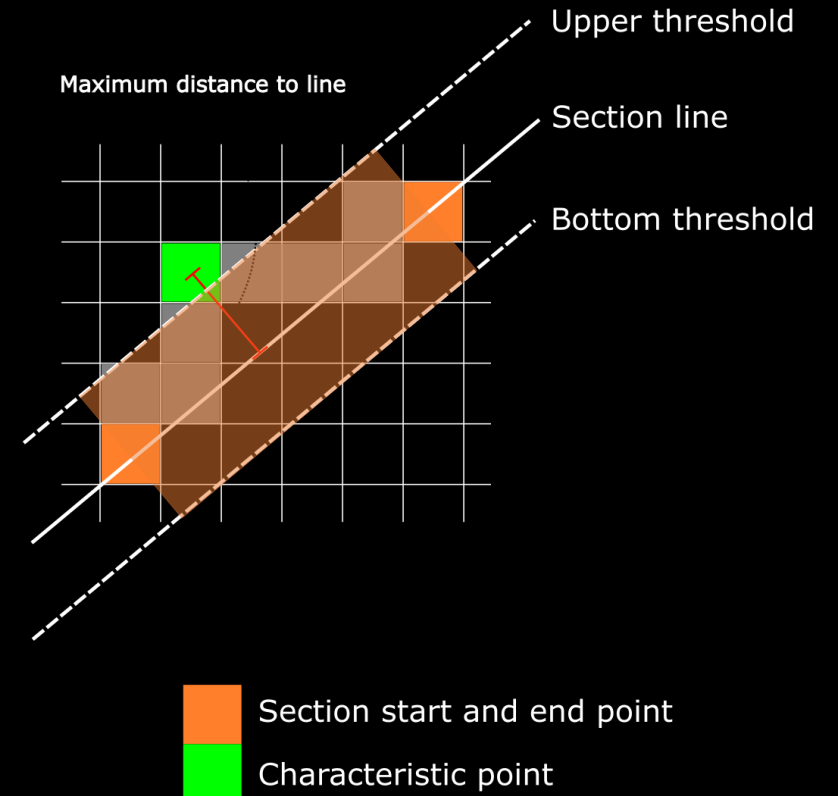
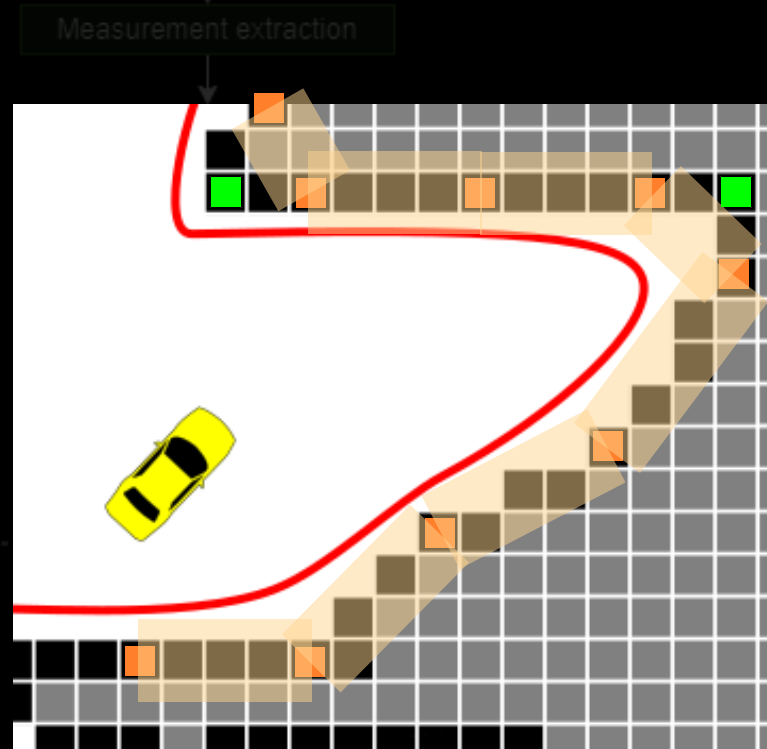
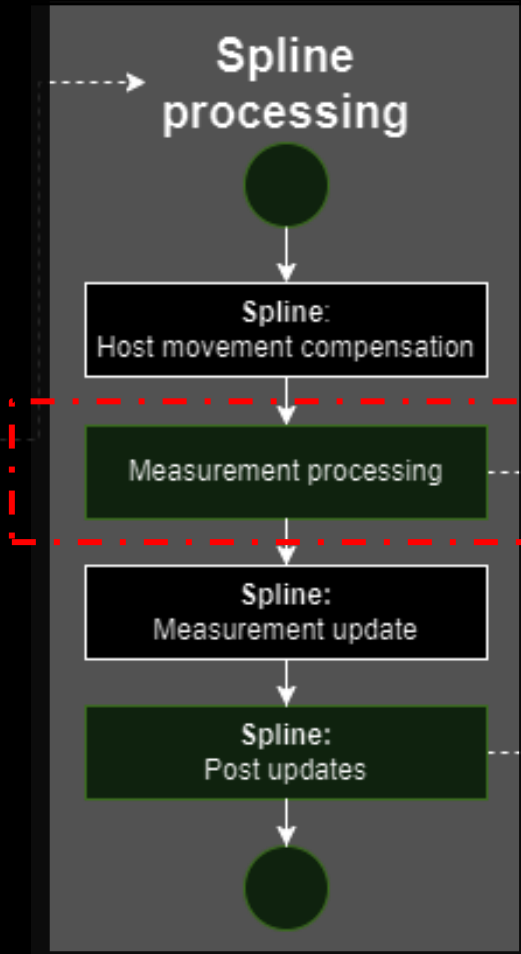


Przetwarzanie punktów pomiarowych



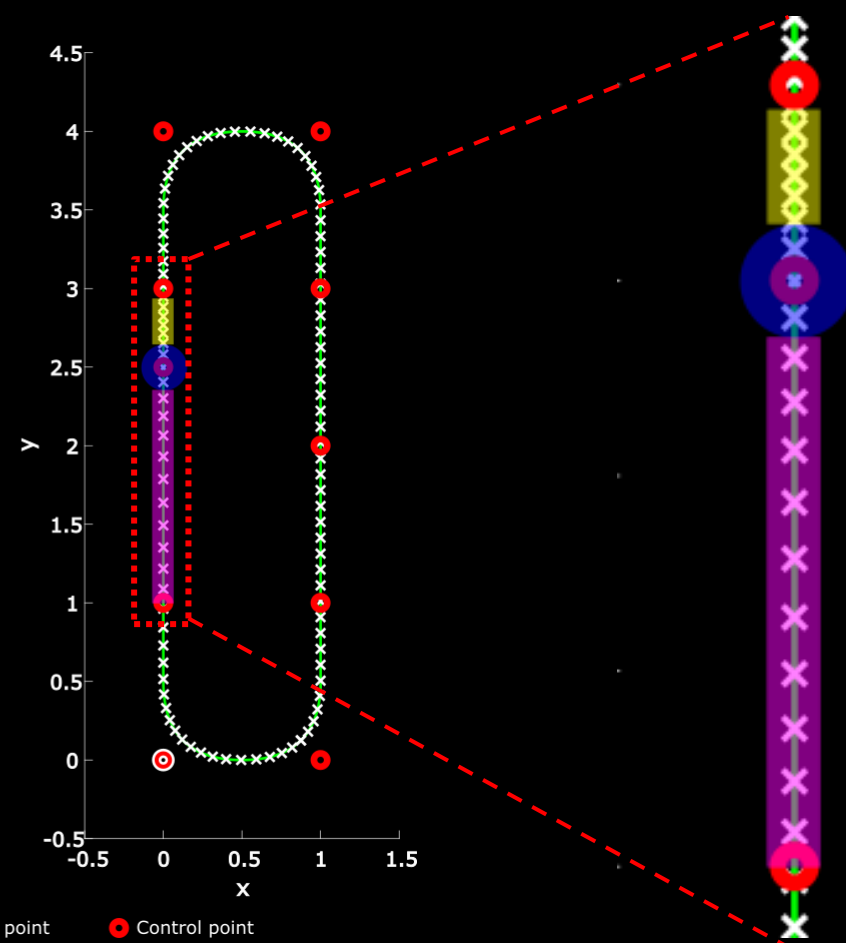
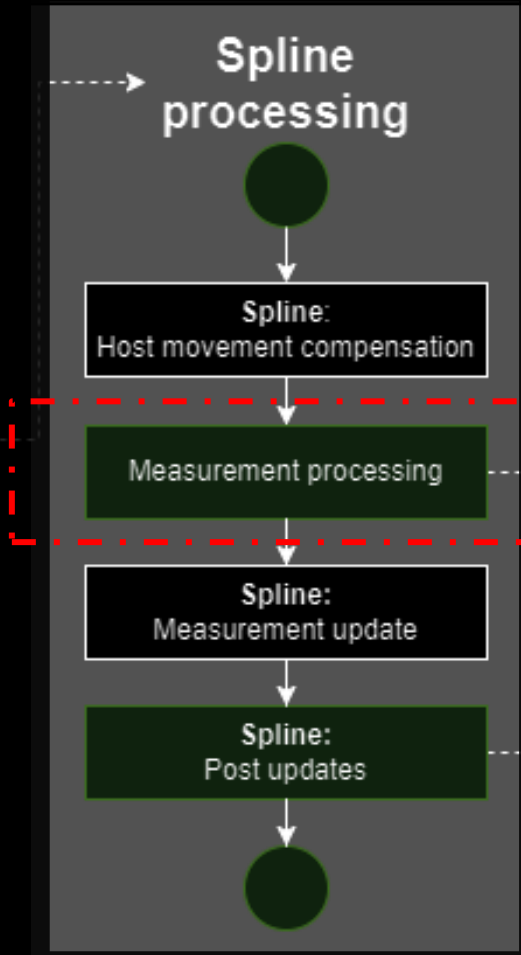
Przetwarzanie punktów pomiarowych

(ekstrakcja pomiarów – metoda „line”)



Przetwarzanie punktów pomiarowych

(asocjacja pomiarów – metoda próbkowania)



Aktualizacja krzywej przez pomiary

(krok aktualizacji przez pomiary - filtr informacyjny - wzór)

$$\mathbf{v}_{k|k} = \hat{\mathbf{v}}_{k|k-1} + \mathbf{l}_k$$

$$\Upsilon_{k|k} = \hat{\Upsilon}_{k|k-1} + \mathbf{L}_k$$

$$\mathbf{L}_k = \mathbf{H}_k^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{H}_k$$

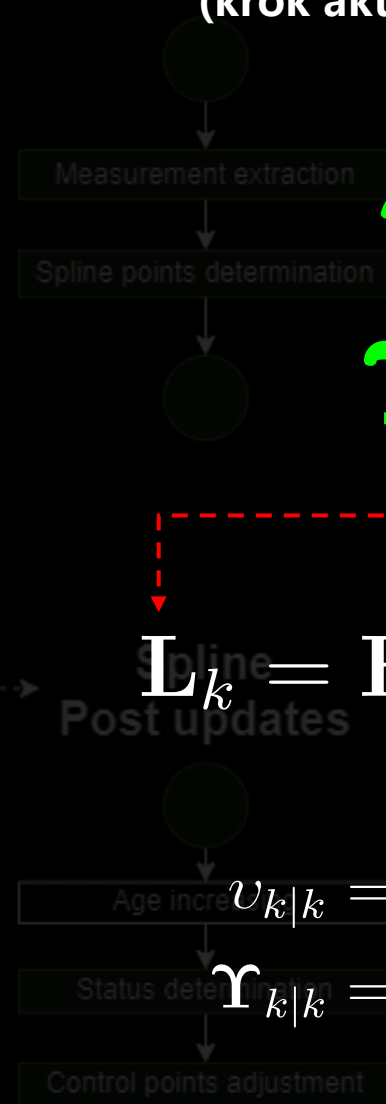
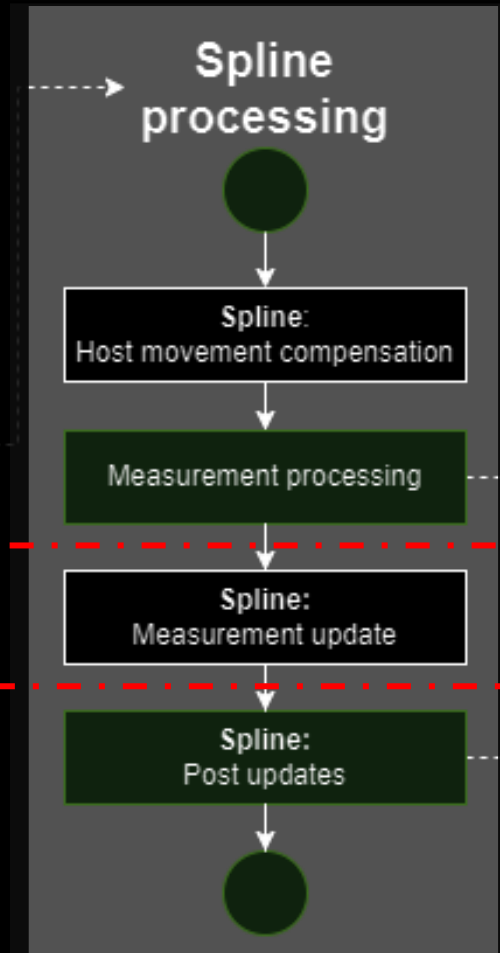
$$\mathbf{l}_k = \mathbf{H}_k^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{z}_k$$

$\mathbf{v}_{k|k}$ - information vector at k-th iteration

$\Upsilon_{k|k}$ - information matrix at k-th iteration

$\mathbf{z}_k$ - measurement vector at k-th iteration

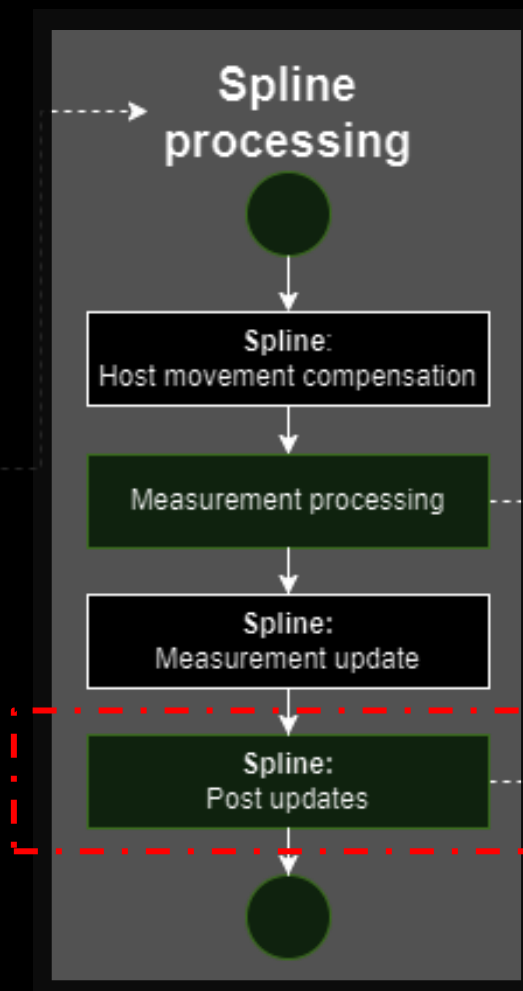
$\mathbf{R}_k$ - measurement noise matrix at k-th iteration



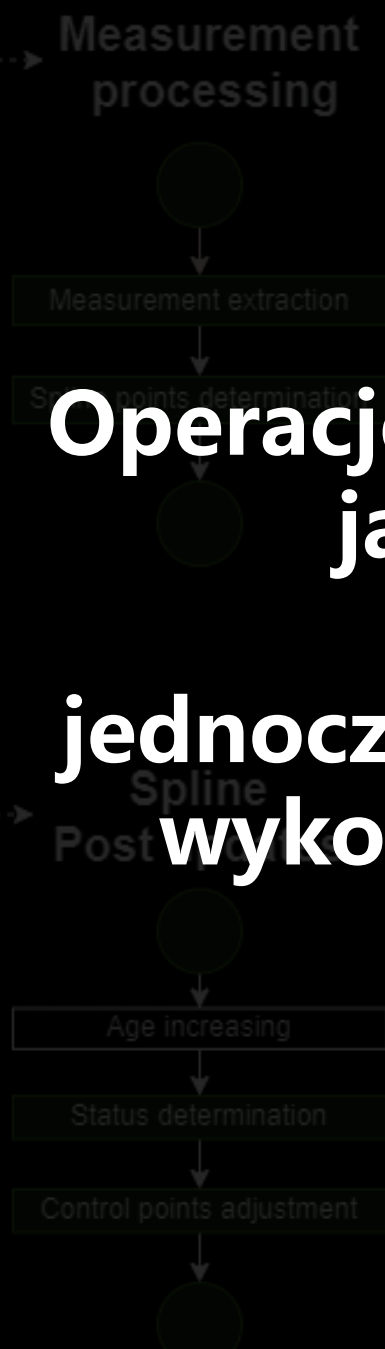
$$\mathbf{v}_{k|k} = \Upsilon_{k|k} \mathbf{q}_{k|k}$$

$$\Upsilon_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k}^{-1}$$

Control points adjustment



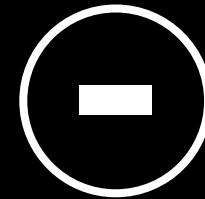
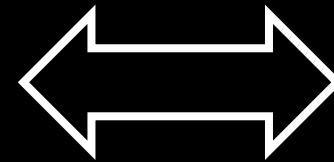
**Operacje na krzywej zwiększające
jakość aproksymacji
przy
jednoczesnej minimalizacji liczby
wykorzystywanych punktów
kontrolnych**



Modyfikacja liczby punktów kontrolnych

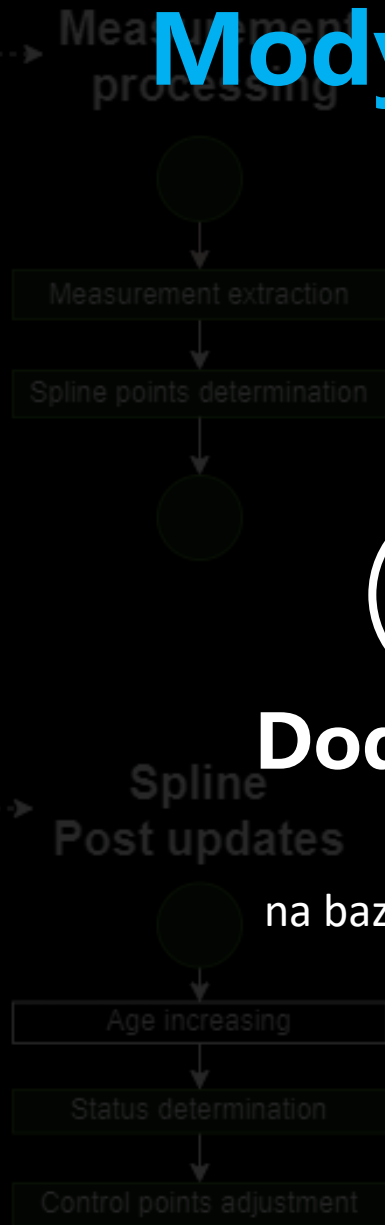
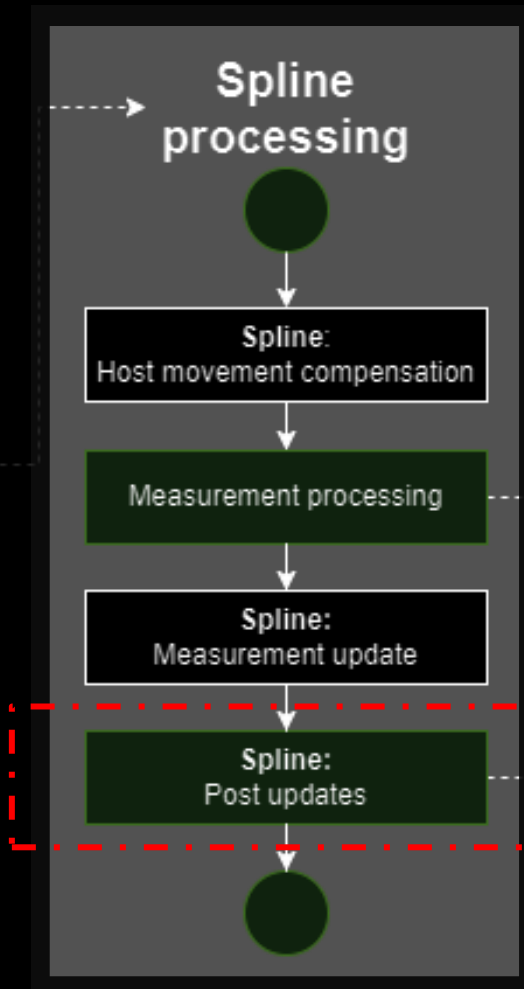


Dodawanie

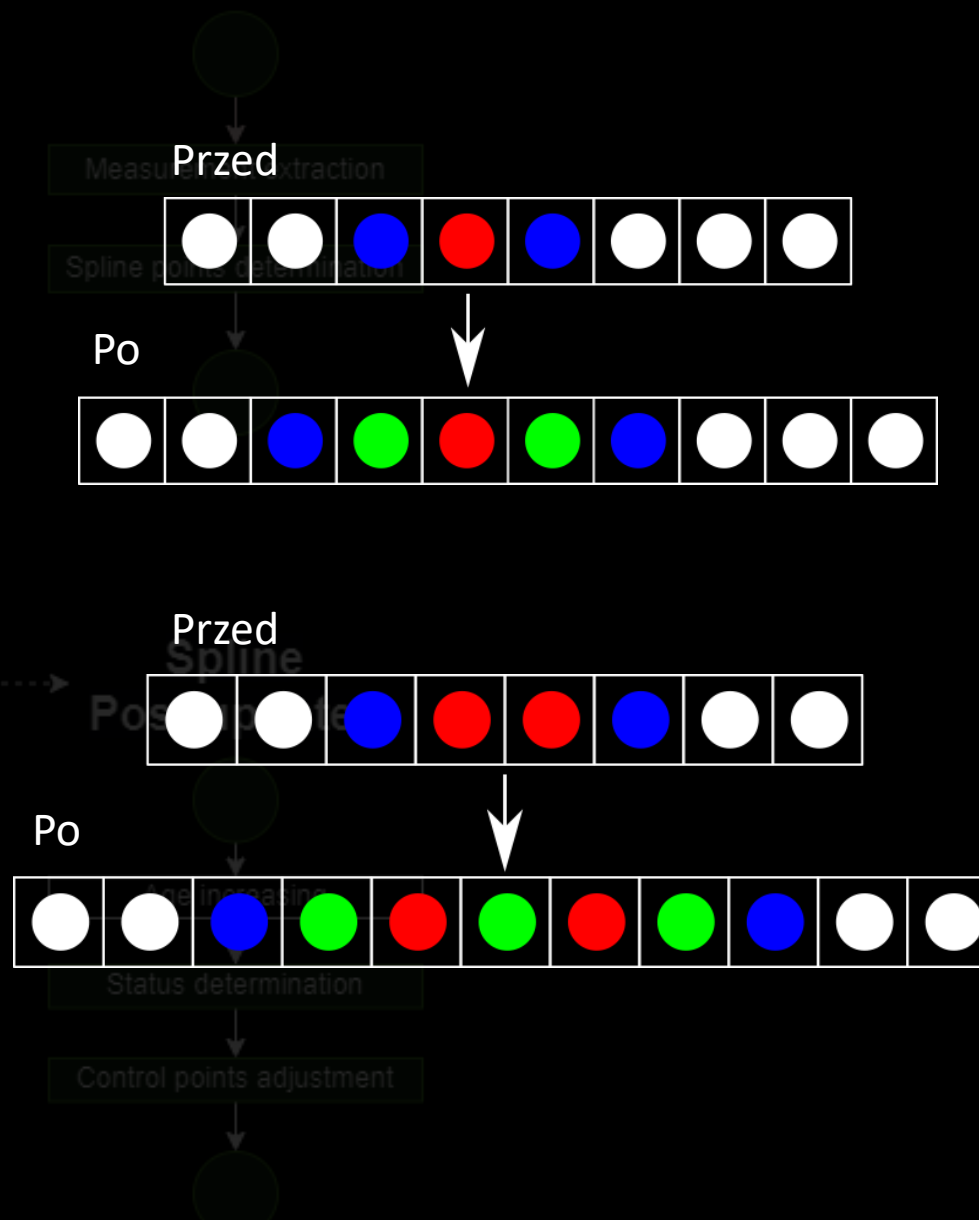
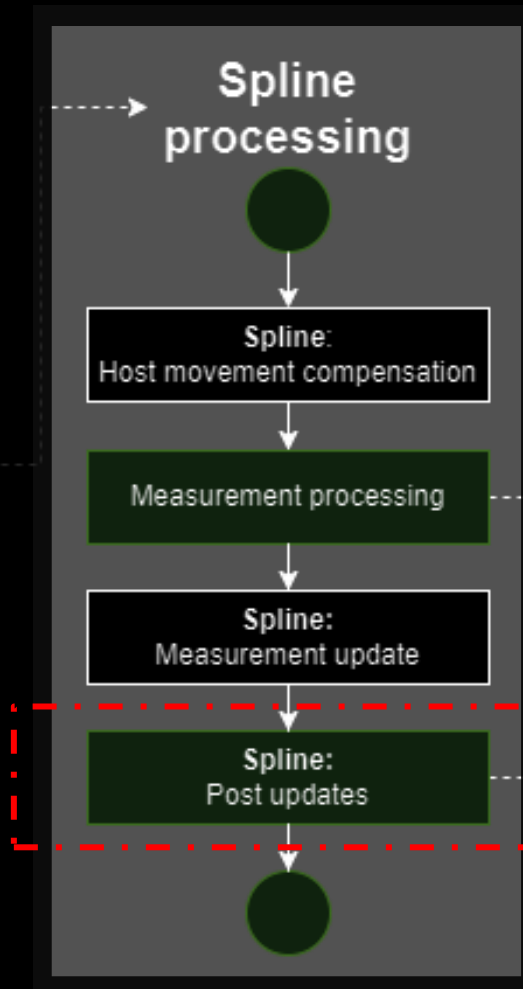


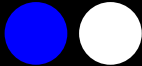
Usuwanie

na bazie informacji zakumulowanych w punkcie kontrolnym



Dodawanie punktów kontrolnych



-  punkt kontrolny spełniający wymagania dodawania
-  nowy punkt kontrolny
-  pozostałe punkty kontrolne

Dodawanie punktów kontrolnych

(parametry nowego punktu)

Pozycja

$$[q_{x,j}, q_{y,j}] = \left[\frac{q_{x,i} + q_{x,i+1}}{2}, \frac{q_{y,i} + q_{y,i+1}}{2} \right]$$

$$\sigma_{x,j}^2 = \begin{cases} \sigma_{x,i}^2 c_\sigma & \text{if } \sigma_{x,i+1}^2 < \sigma_{x,i}^2 \\ \sigma_{x,i+1}^2 c_\sigma & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sigma_{y,j}^2 = \begin{cases} \sigma_{y,i}^2 c_\sigma & \text{if } \sigma_{y,i+1}^2 < \sigma_{y,i}^2 \\ \sigma_{y,i+1}^2 c_\sigma & \text{otherwise} \end{cases}$$

Pozostałe

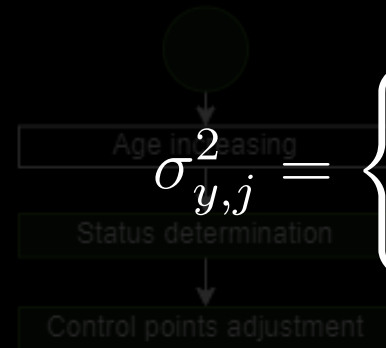
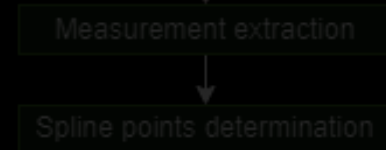
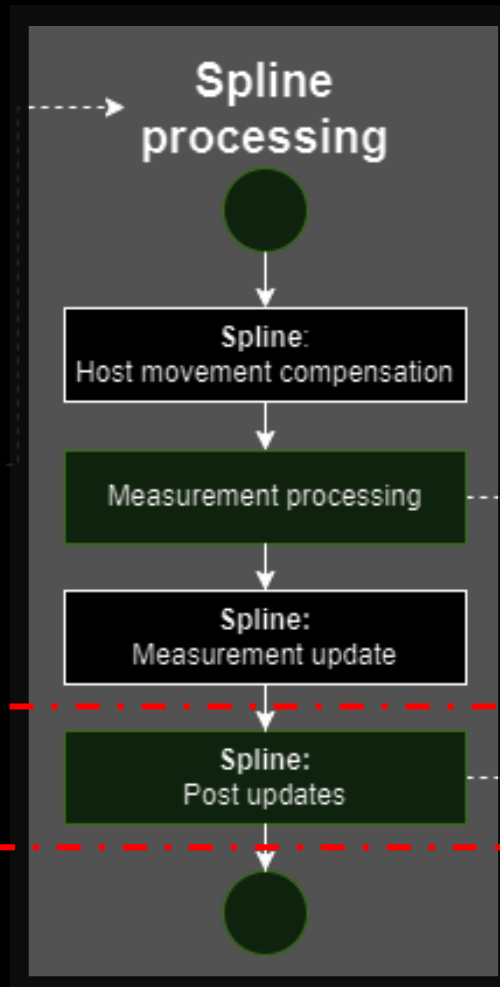
$$\Psi_j = 0.0$$

$$\Phi_j = 0.0$$

$$\Omega_j = NEW$$

$$\tau_j = 1$$

$$\kappa_j = 1$$



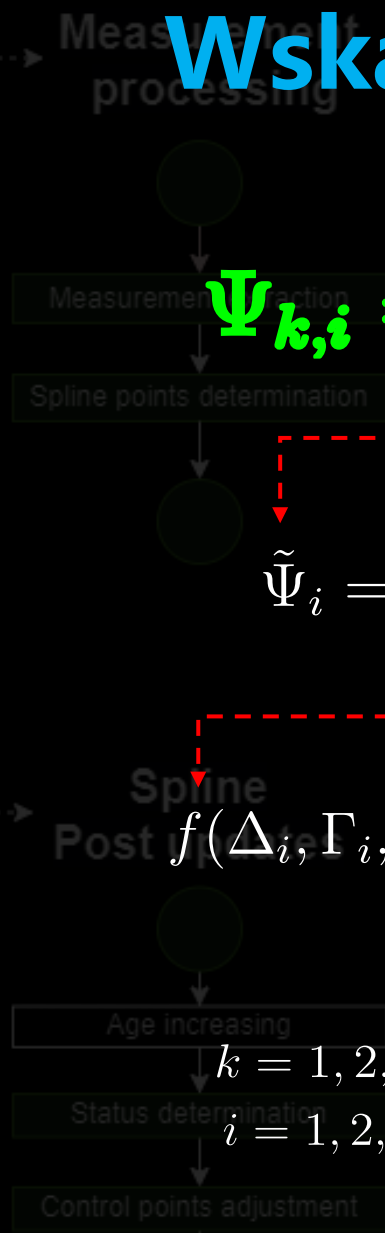
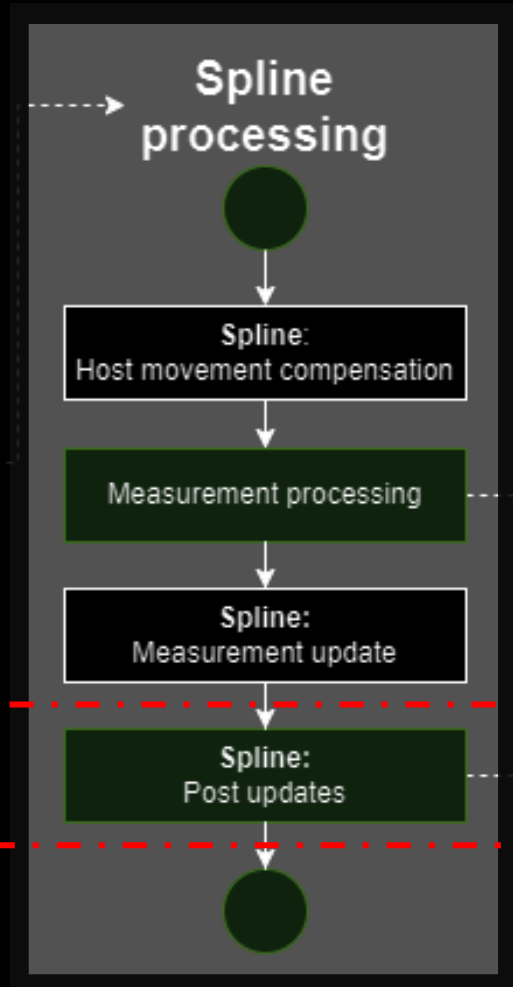
Wskaźnik złożoności krzywej (wzór)

$$\Psi_{k,i} = (1 - c_{\Psi})\Psi_{k-1,i} + c_{\Psi}\tilde{\Psi}_{k,i}$$

$$\tilde{\Psi}_i = \min(\max(f(\Delta_i, \Gamma_i, \Theta_i, \Xi_i), -1), 1)$$

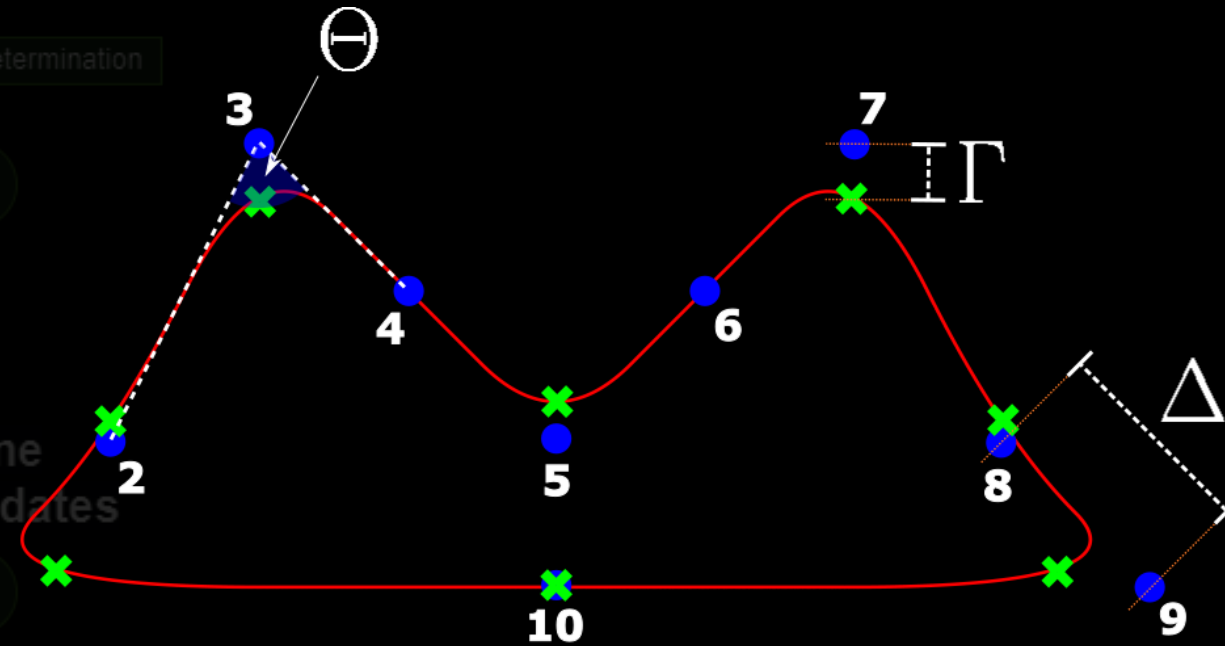
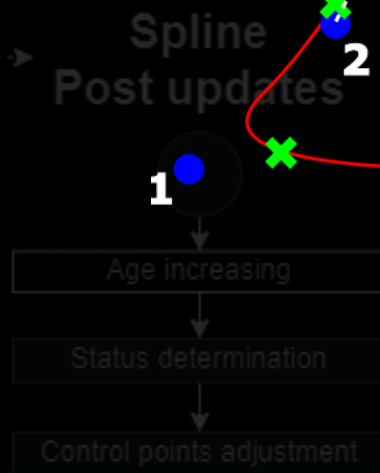
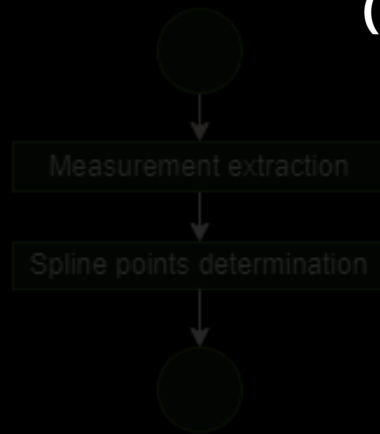
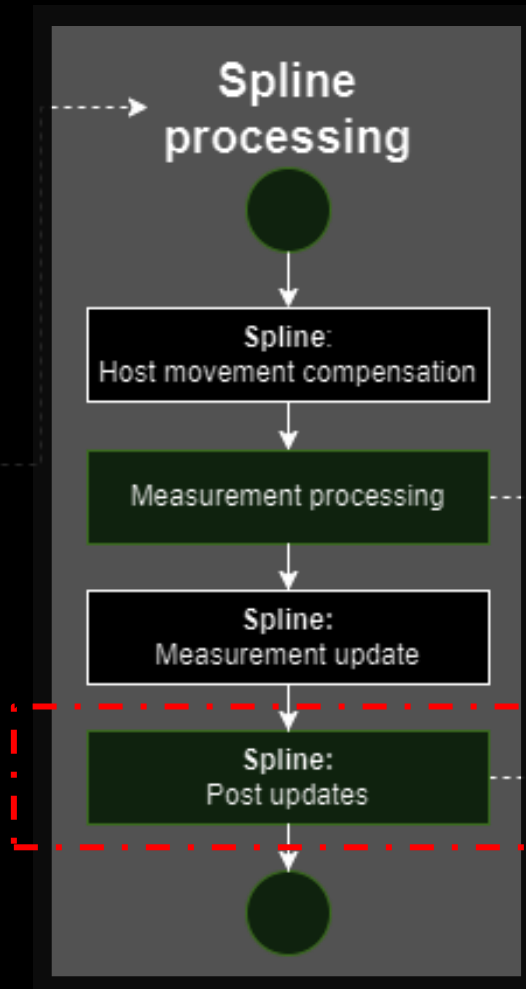
$$f(\Delta_i, \Gamma_i, \Theta_i, \Xi_i) = \begin{cases} \Gamma_i + \Delta_i + \Xi_i & \text{for } \Gamma_i \leq 0 \\ \Theta_i \cdot \Gamma_i + \Delta_i + \Xi_i & \text{otherwise} \end{cases}$$

- Δ_i - i-th control point distance complexity indicator
- Γ_i - i-th control point corresponding spline point complexity indicator
- Θ_i - i-th control point angle complexity indicator
- Ξ_i - i-th control point host dependent indicator



Wskaźnik złożoności krzywej

(lokalna złożoność krzywej - wizualizacja)



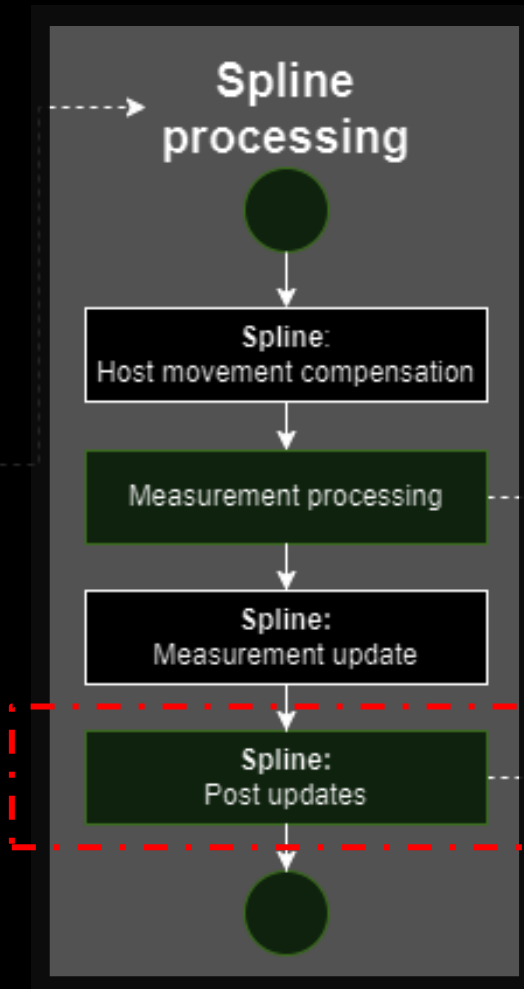
- Spline
- Control point
- ✕ Corresponding spline point

Wskaźnik złożoności krzywej

(dystans pomiędzy punktami kontrolnymi)

$$\Delta_i = \begin{cases} 0, & \check{\Delta}_i \leq \Delta_{low} \\ (\check{\Delta}_i - \Delta_{low}) \cdot \left(\frac{1}{\Delta_{high} - \Delta_{low}} \right) & \check{\Delta}_i \in (\Delta_{low}, \Delta_{high}) \\ 1, & \Delta_{high} \leq \check{\Delta}_i \end{cases}$$

$$\check{\Delta}_i = d(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_{i-1})$$



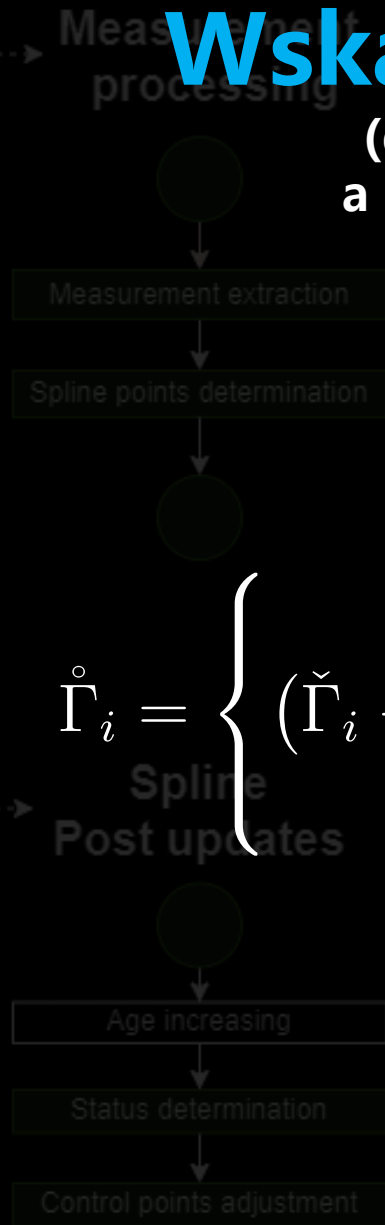
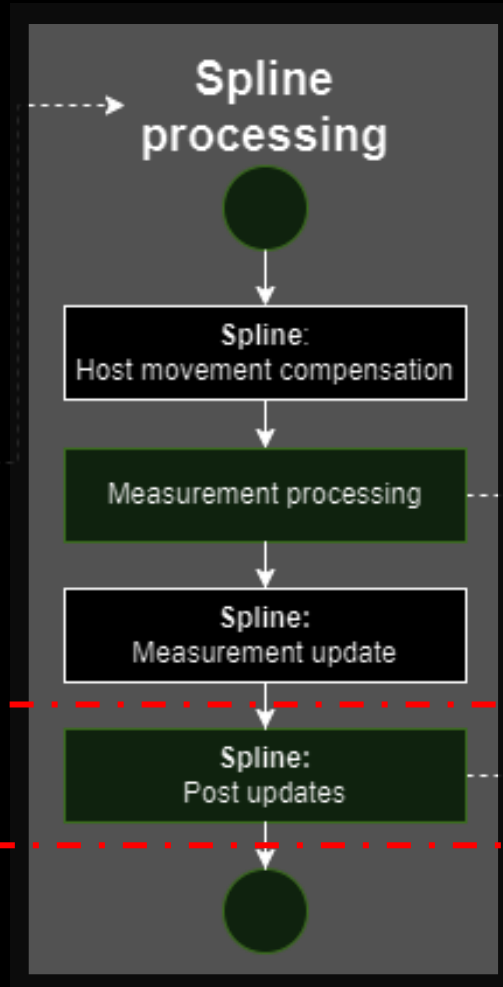
Wskaźnik złożoności krzywej

(dystans pomiędzy punktem kontrolnym,
a odpowiadającym mu punkcie na krzywej)

$$\Gamma_i = \max(\mathring{\Gamma}_{i-1}, \mathring{\Gamma}_i)$$

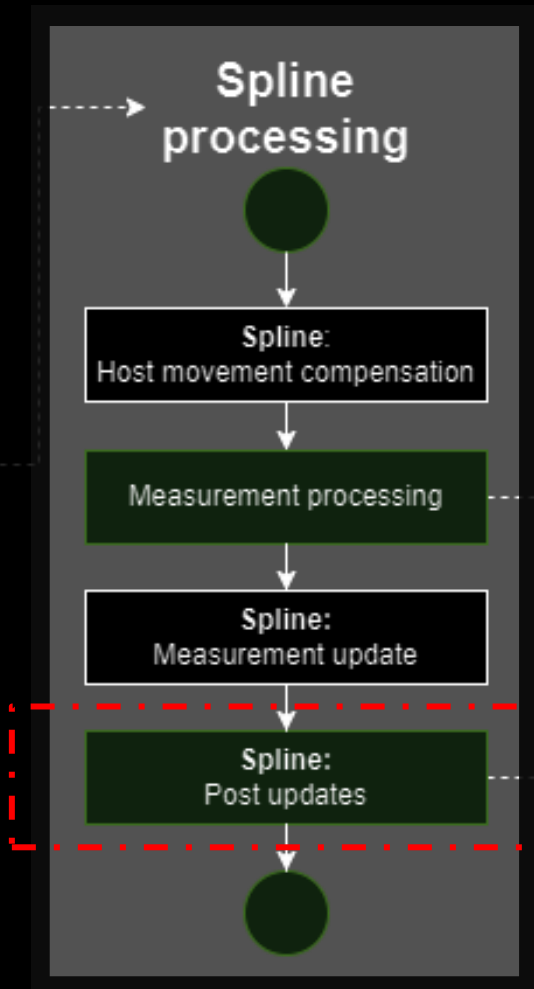
$$\mathring{\Gamma}_i = \begin{cases} -1, & \check{\Gamma}_i \leq \Gamma_{low} \\ (\check{\Gamma}_i - \Gamma_{low}) \cdot \left(\frac{2}{\Gamma_{high} - \Gamma_{low}} \right) - 1 & \check{\Gamma}_i \in (\Gamma_{low}, \Gamma_{high}) \\ 1, & \Gamma_{high} \leq \check{\Gamma}_i \end{cases}$$

$$\check{\Gamma}_i = d(\mathbf{q}_i, \mathring{\mathbf{q}}_i)$$

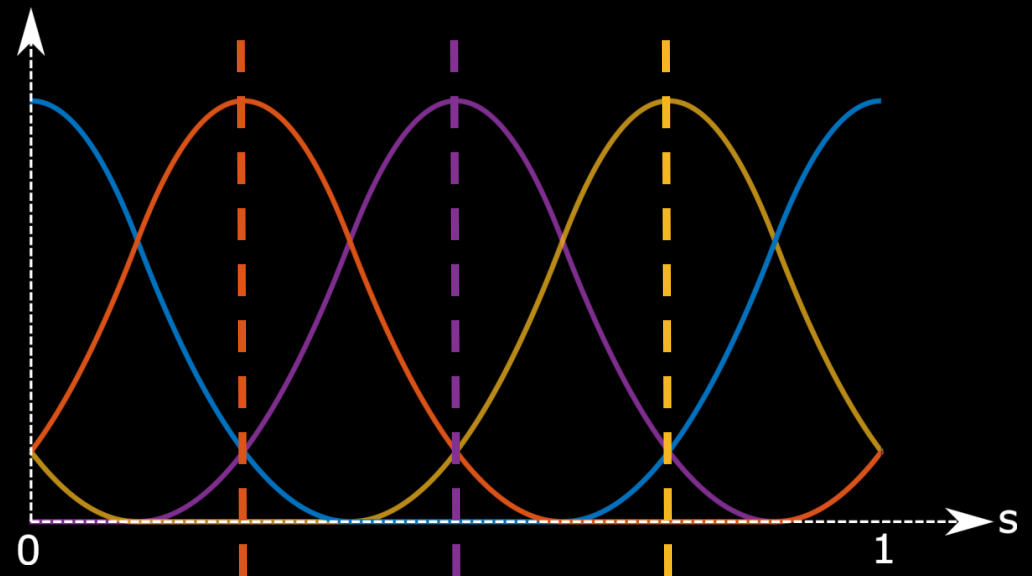


Wskaźnik złożoności krzywej

(punkt na krzywej odpowiadający punktowi kontrolnemu)



$$\mathbf{r}(s_i) = r \left(\frac{i-1}{N_q} \right)$$



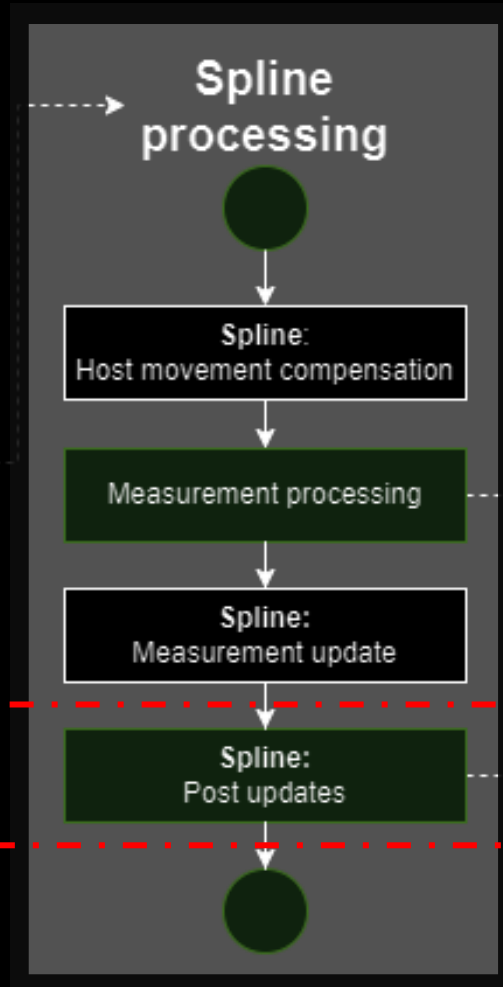
$$s_i = \operatorname{argmax} \left(B_i^{[n]}(s) \right)$$

Wskaźnik złożoności krzywej

(kąt pomiędzy trzema kolejnymi punktami kontrolnymi)

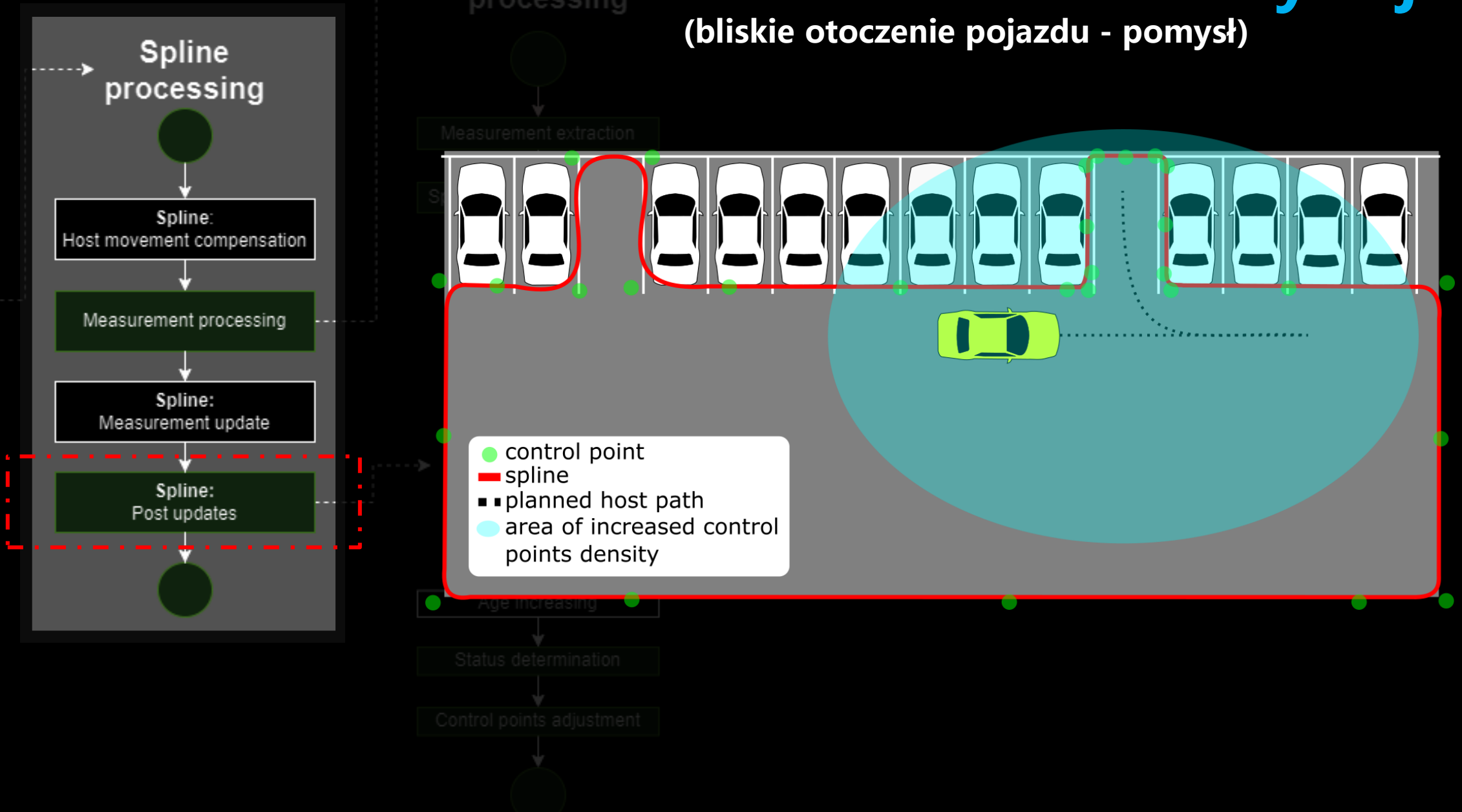
$$\Theta_i = \begin{cases} 0, & \check{\Theta}_i \leq \Theta_{low} \\ (\check{\Theta}_i - \Theta_{low}) \cdot \left(\frac{1}{\Theta_{high} - \Theta_{low}} \right) & \check{\Theta}_i \in (\Theta_{low}, \Theta_{high}) \\ 1, & \Theta_{high} \leq \check{\Theta}_i \end{cases}$$

$$\check{\Theta}_i = h(\mathbf{q}_{i-1}, \mathbf{q}_i, \mathbf{q}_{i+1})$$



Wskaźnik złożoności krzywej

(bliskie otoczenie pojazdu - pomysł)



Wskaźnik złożoności krzywej

(bliskie otoczenie pojazdu - wzór)

$$\Xi_i = \begin{cases} \Xi_{high} & \text{if } \left(\frac{q_{x,i}-e_x}{a}\right)^2 + \left(\frac{q_{y,i}-e_y}{b}\right)^2 \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Lateral

Spline
Post updates

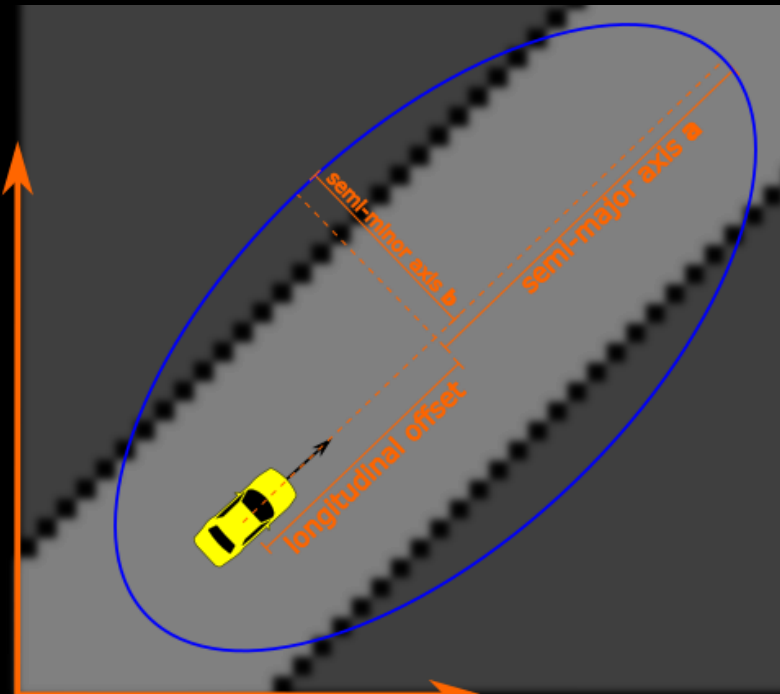
Age increasing

Status determination

Control points adjustment

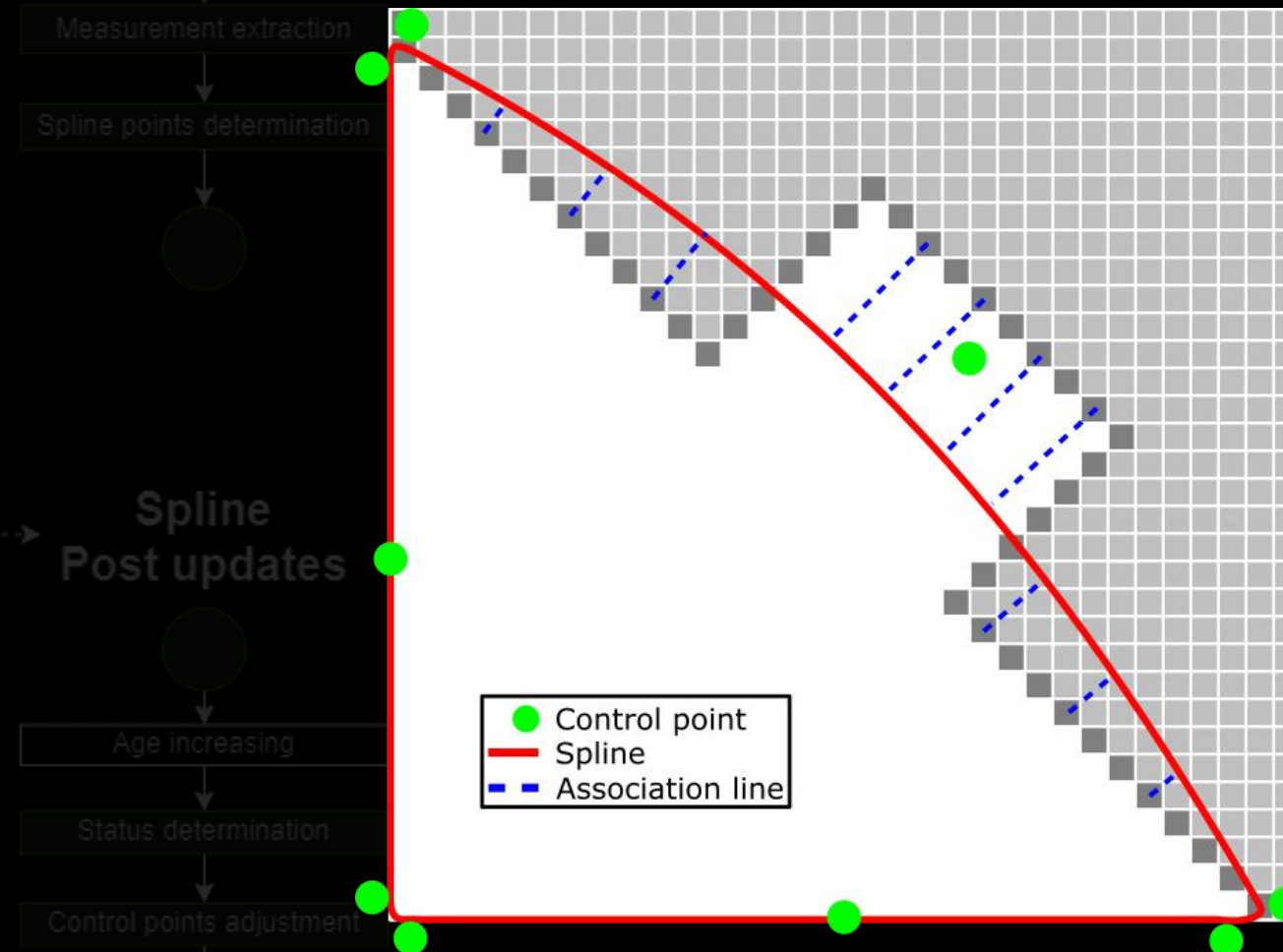
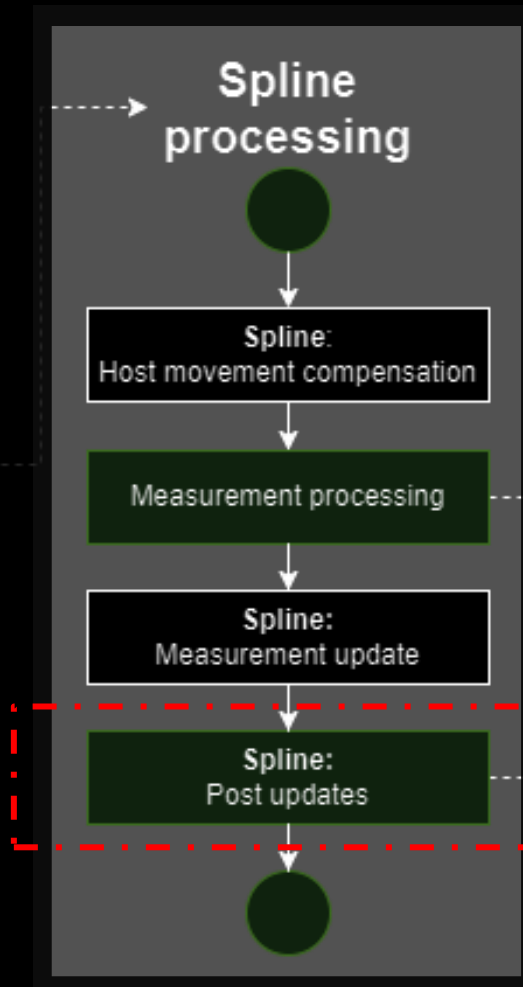
GRCS

Longitudinal

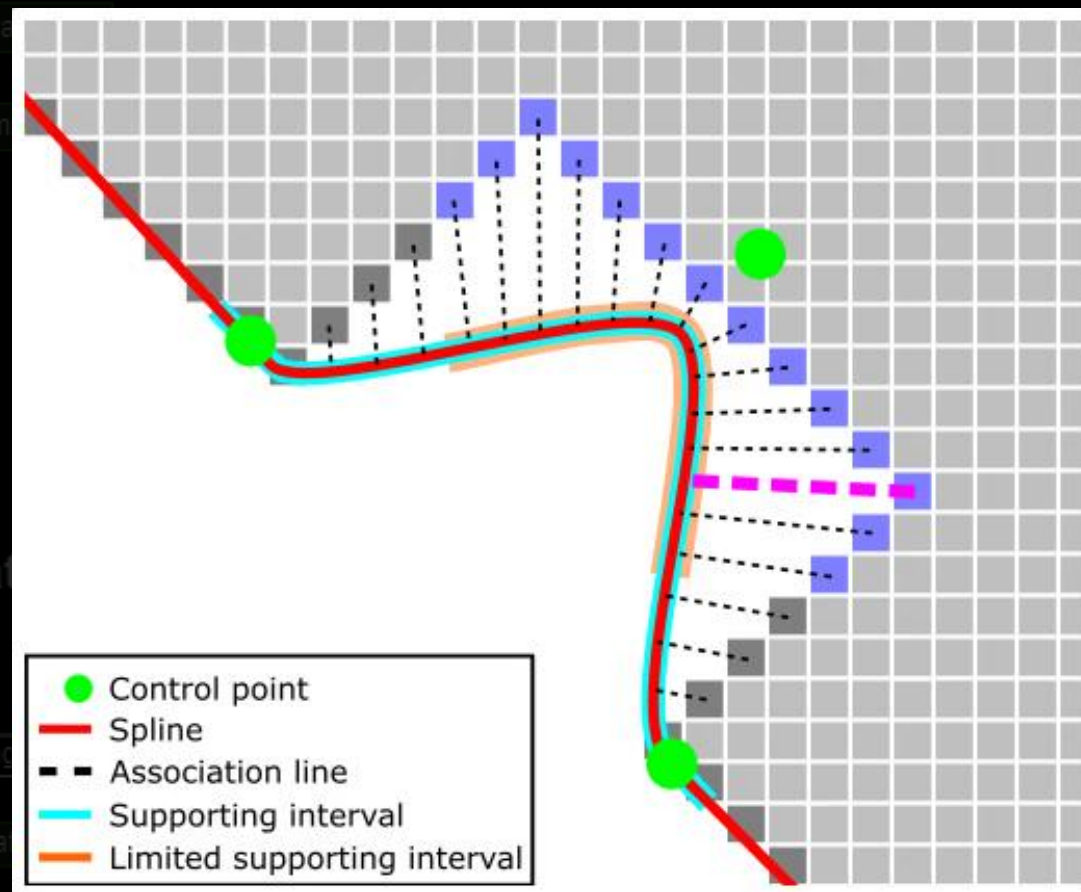
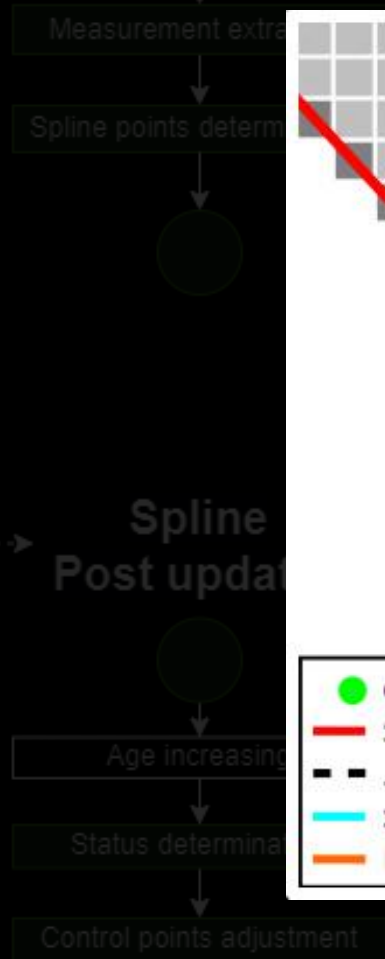
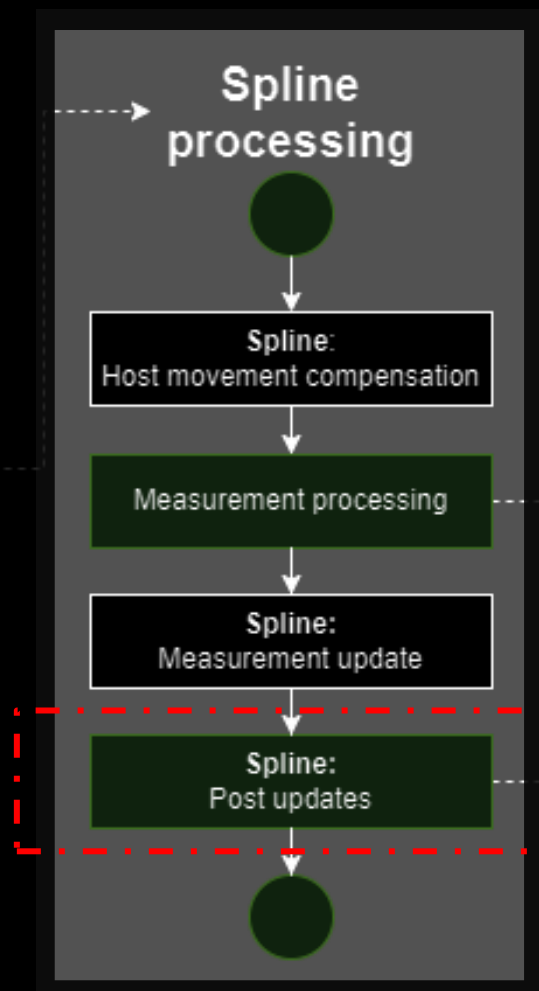


Wskaźnik dopasowania krzywej

(problem lokalnego minimum)



Wskaźnik dopasowania krzywej (rozwiązanie)



Wskaźnik dopasowania krzywej

(wzór)

$$\Phi_{k,i} = (1 - c_\Phi) \Phi_{k-1,i} + c_\Phi \check{\Phi}_{k,i}$$

$$\check{\Phi}_{k,i} = \begin{cases} 0, & \check{\Phi}_{k,i} \leq 0 \\ \frac{\check{\Phi}_{k,i}}{\Phi_{high}}, & \check{\Phi}_{k,i} \in (0, \Phi_{high}) \\ 1, & \Phi_{high} \leq \check{\Phi}_{k,i} \end{cases}$$

$$\check{\Phi}_{k,i} = \begin{cases} d_i^{max} & \text{if } d_{th} < d_i^{max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$d_i^{max} = \max_j \left(\left\{ d(r(s_j), z_j) : s_j \in \check{\Lambda}_i \right\} \right)$$

$$\check{\Lambda}_i \subset \Lambda_i$$

c_Φ - filter factor

$d(a,b)$ - Euclidean distance between point a and b

d_i^{max} - maximum $d(a, b)$ of the i-th control point

$r(s_j)$ - j-th spline point

z_j - j-th measurement point corresponding to j-th spline point

$\check{\Lambda}_i$ - limited supporting interval of the i-th control point

Reguły usuwania

1. Mała lokalna złożoność kształtu krzywej

$$\Psi_i < \Psi_{removal}$$

2. Duże niedokładności

$$\sigma_{x,i}^2 + \sigma_{y,i}^2 > \sigma_{removal}^2$$

$$\kappa_i > \kappa_{uncertainty}$$

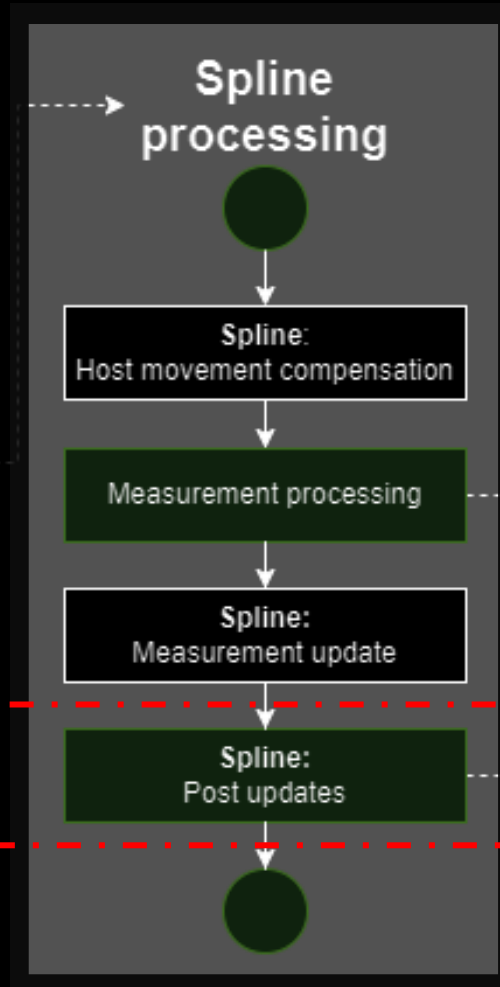
3. Brak pomiarów

$$\Omega_i = COASTED$$

$$\tau_i > \tau_{status}$$

4. Kolejne punkty kontrolne zbyt blisko siebie

$$d(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_{i+1}) < d_{close}$$



Measurement processing

Measurement extraction

Spline points determination

Spline Post updates

Age increasing

Status determination

Control points adjustment

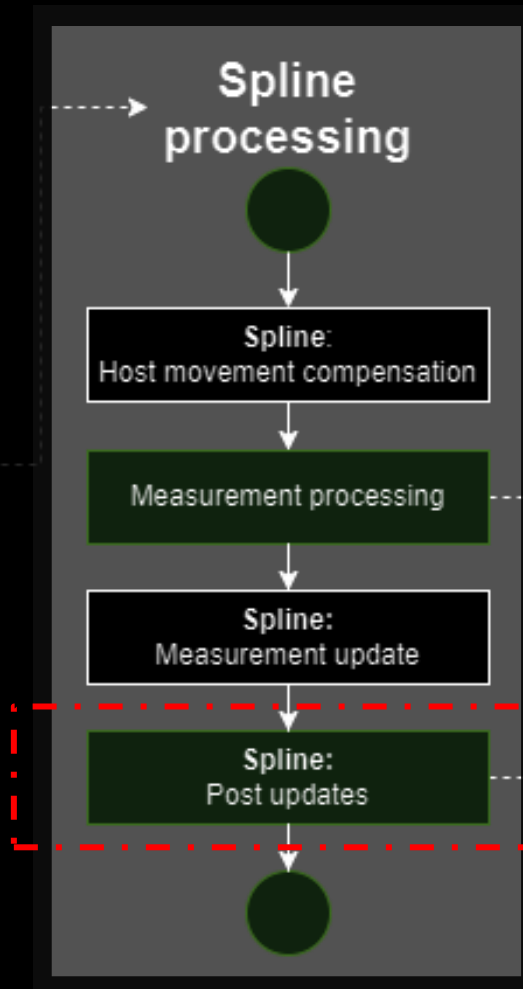
Reguły dodawania

1. Duża lokalna złożoność kształtu krzywej

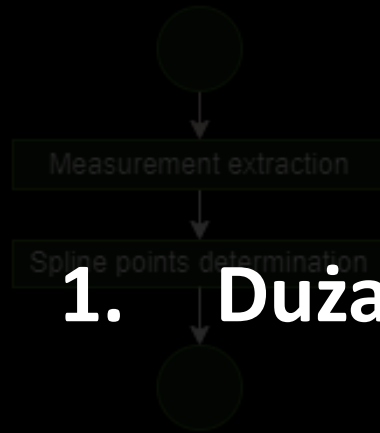
$$\Psi_i > \Psi_{addition}$$

2. Słabe dopasowanie krzywej

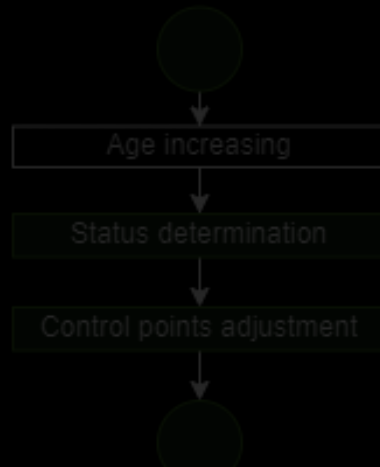
$$\Phi_i > \Phi_{addition}$$



Measurement processing

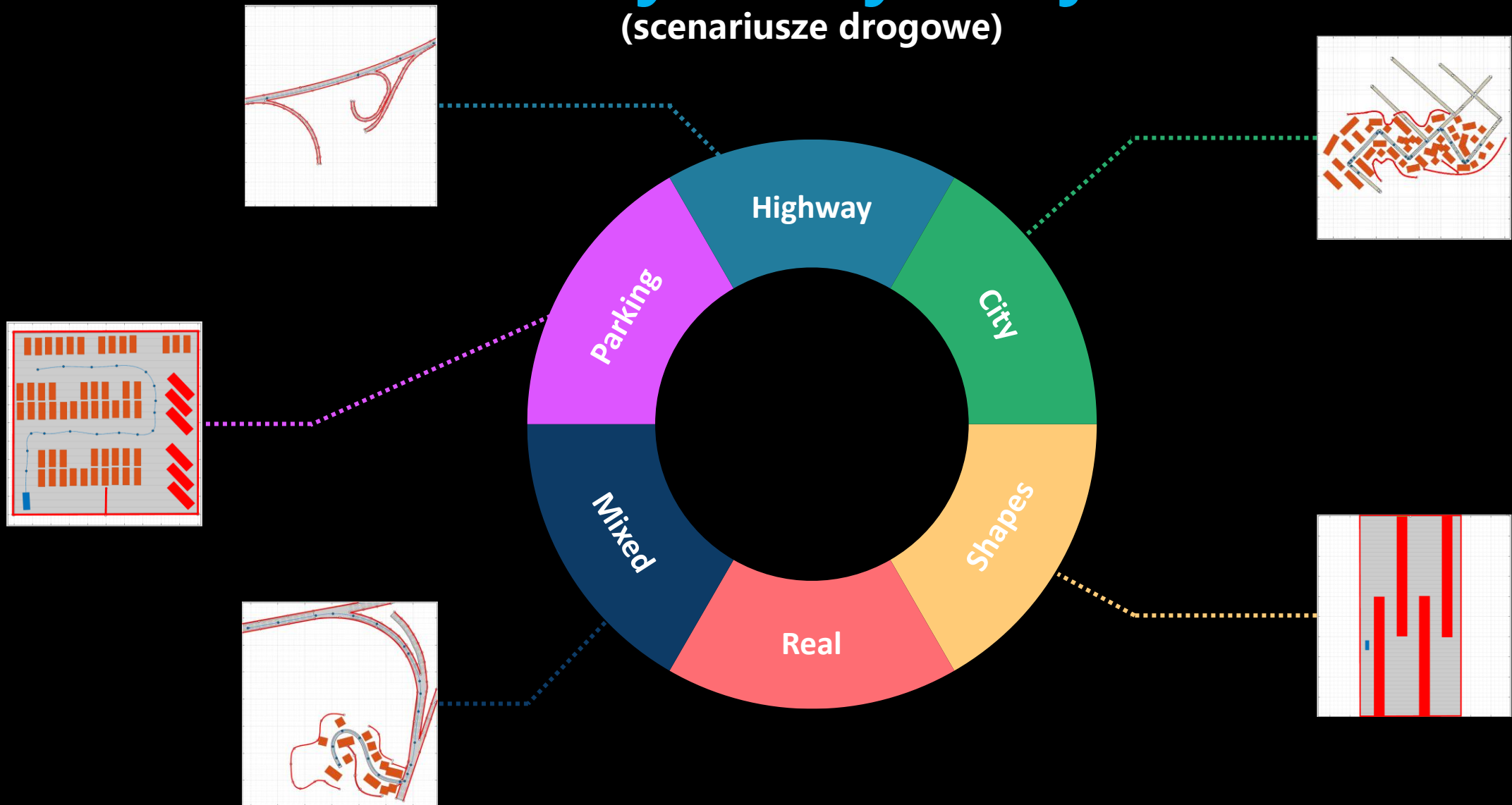


Spline Post updates



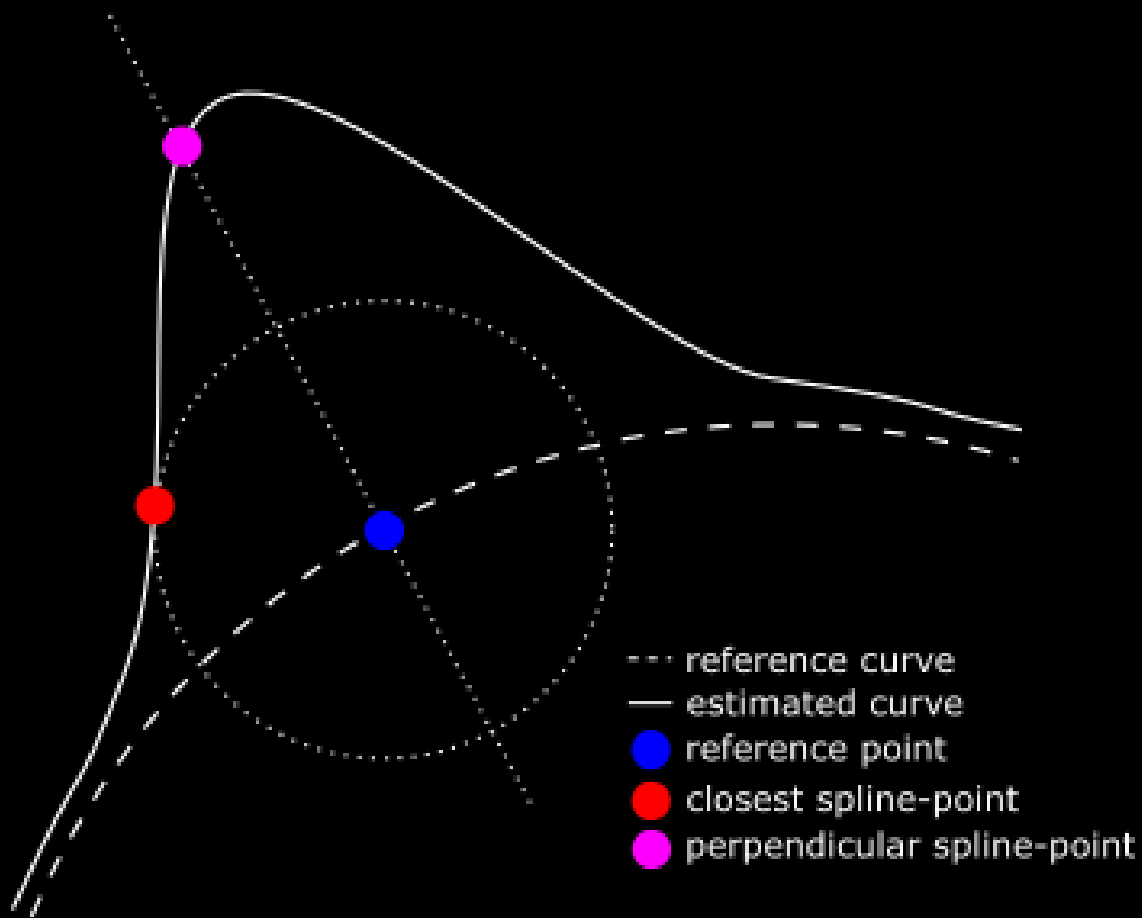
Testy i weryfikacja

(scenariusze drogowe)



Testy i weryfikacja

(krzywa estymowana vs referencja)



$$\varepsilon_i = d(\mathbf{r}(s_i), \mathbf{p}_i)$$

$\mathbf{p}_i$ - i-th reference point position

$\mathbf{r}(s_i)$ - i-th sampled spline point position (corresponding to i-th reference point) determined by proposed methodologies

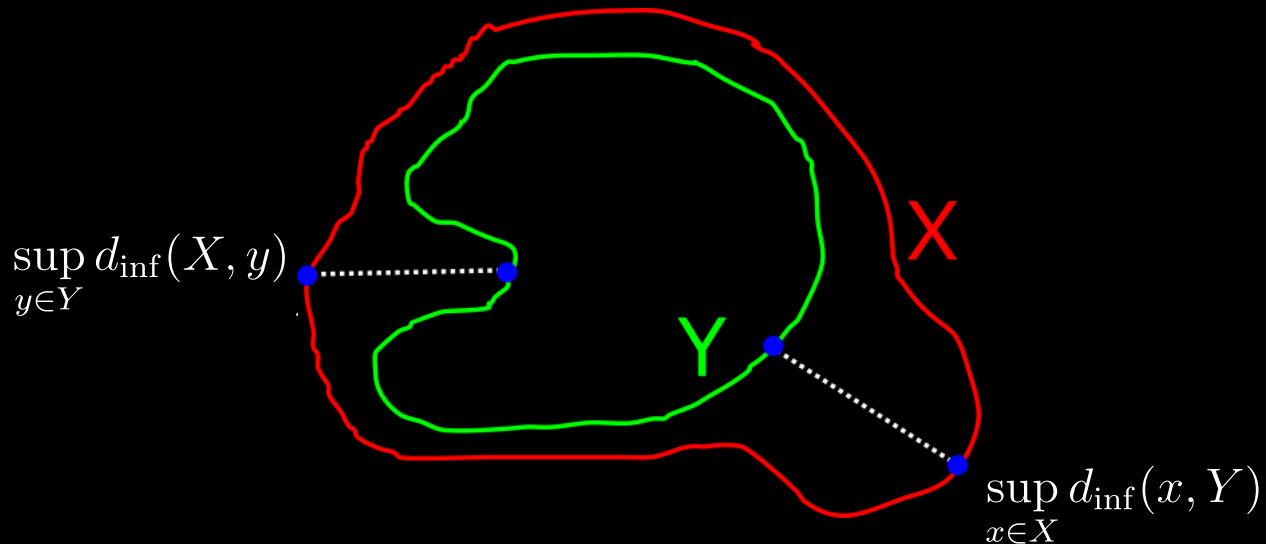
$d(a,b)$ - distance between two points a and b

Testy i weryfikacja

(Hausdorff distance)

$$d_{\text{Hausdorff}}(X, Y) = \max \left\{ \sup_{x \in X} d_{\text{inf}}(x, Y), \sup_{y \in Y} d_{\text{inf}}(X, y) \right\}$$

$$d_{\text{inf}}(x, Y) = \inf_{y \in Y} d(x, y)$$



X, Y - nonempty subsets

$d(a, b)$ - Euclidean distance between points a and b

$\inf$ - the infimum

$\sup$ - the supremum

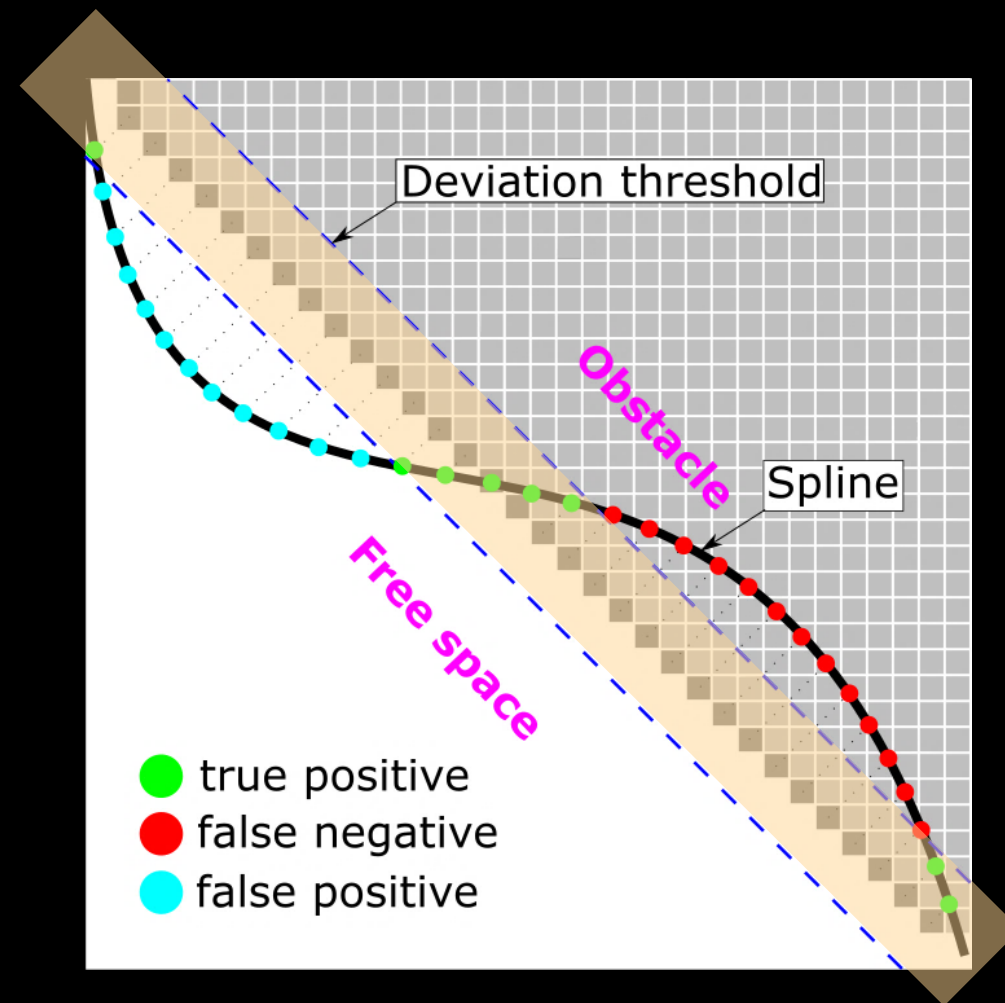
Testy i weryfikacja

(metryki - klasyfikacja)

$$TPR = \frac{\#TP}{\#TP + \#FN}$$

$$PPV = \frac{\#TP}{\#TP + \#FP}$$

$$F1 = \frac{2 \cdot \#TP}{2 \cdot \#TP + \#FP + \#FN}$$



Testy i weryfikacja

(metryki - aproksymacja)

$$\varepsilon_k^{mean} = \frac{1}{N_k^{ref}} \sum_i \varepsilon_i$$

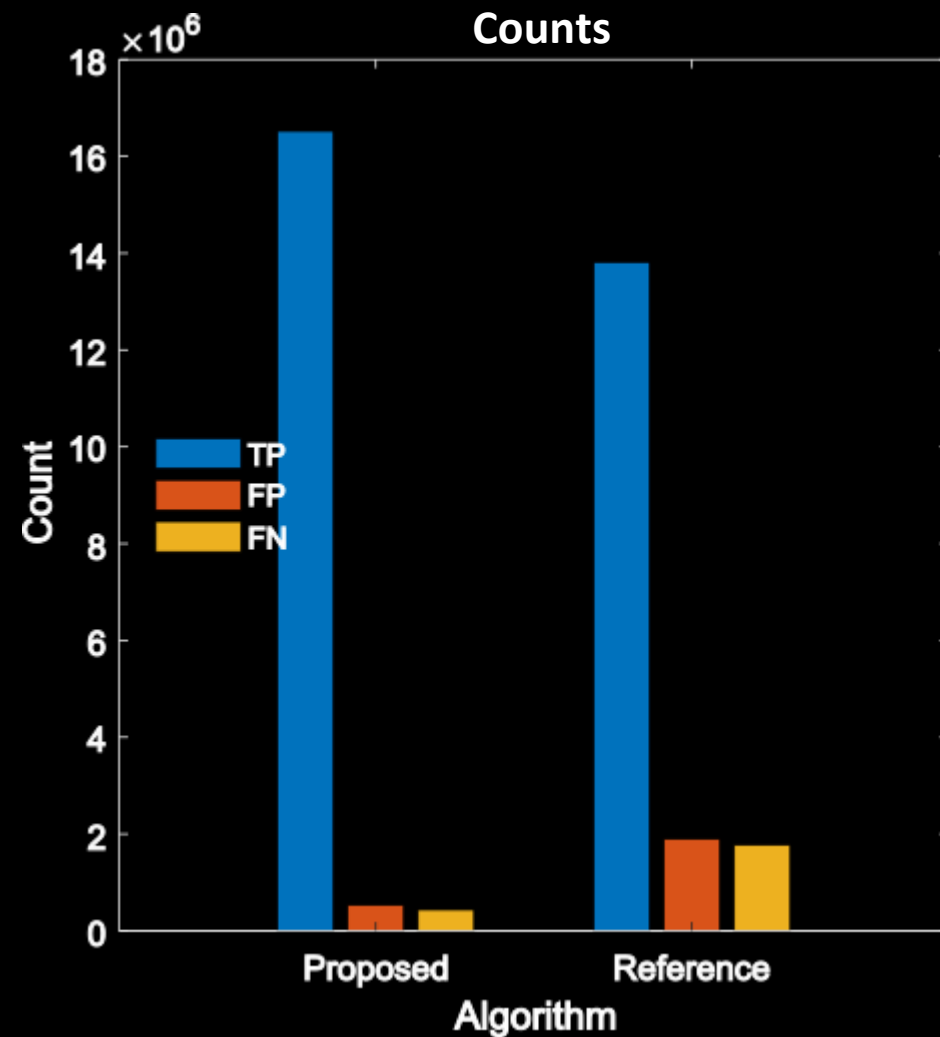
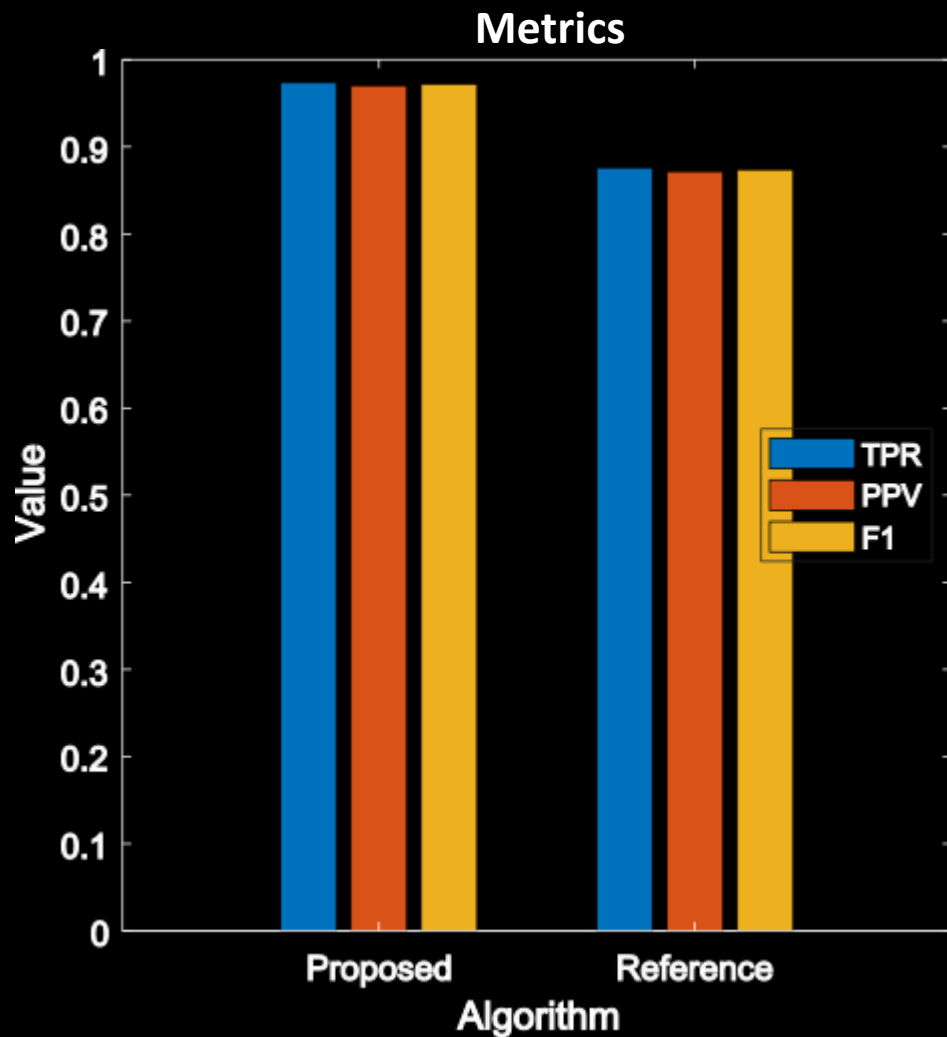
$$\varepsilon_k^{max} = \max_i (\varepsilon_i)$$

$$\varepsilon_k^{std} = \sqrt{\frac{1}{N_k^{ref}} \sum_i (\varepsilon_i - \varepsilon_k^{mean})^2}$$

N_k^{ref} - number of reference points in k-th iteration

Testy i weryfikacja

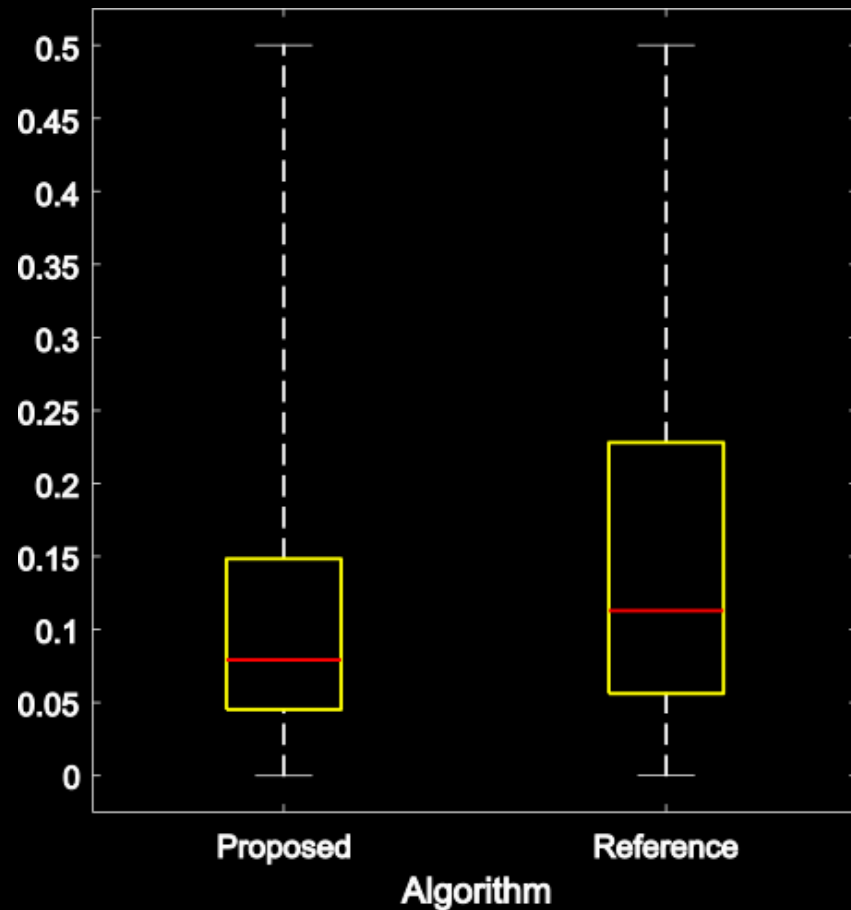
(wyniki ogólne - klasyfikacja)



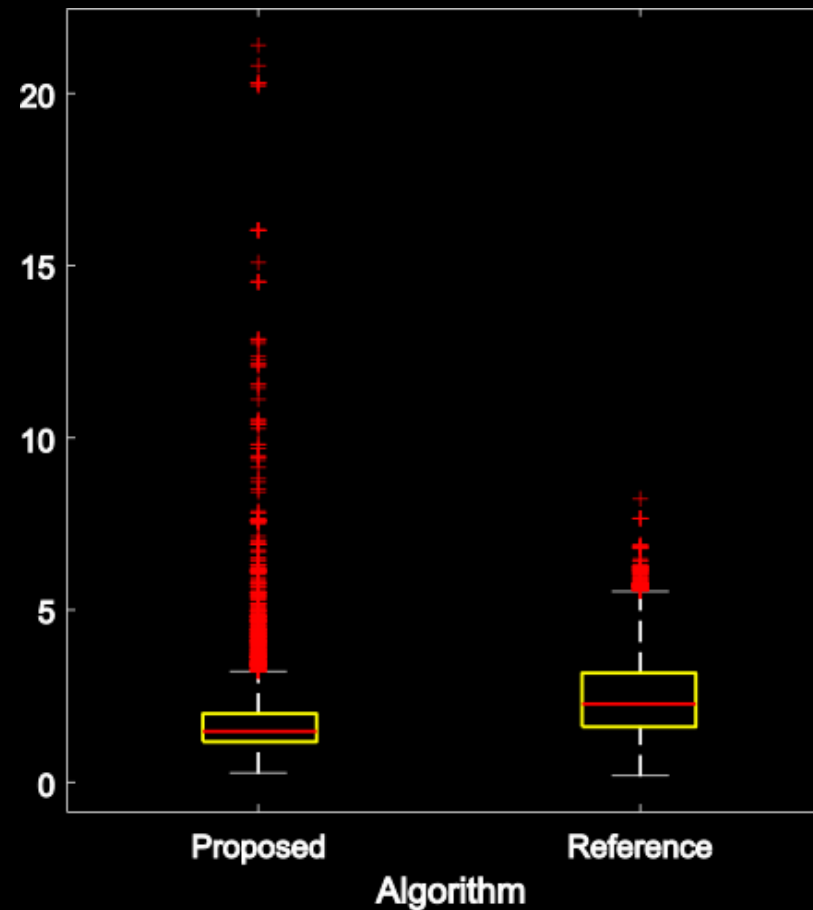
Testy i weryfikacja

(wyniki ogólne - aproksymacja)

Approximation errors box plot
(closest point)

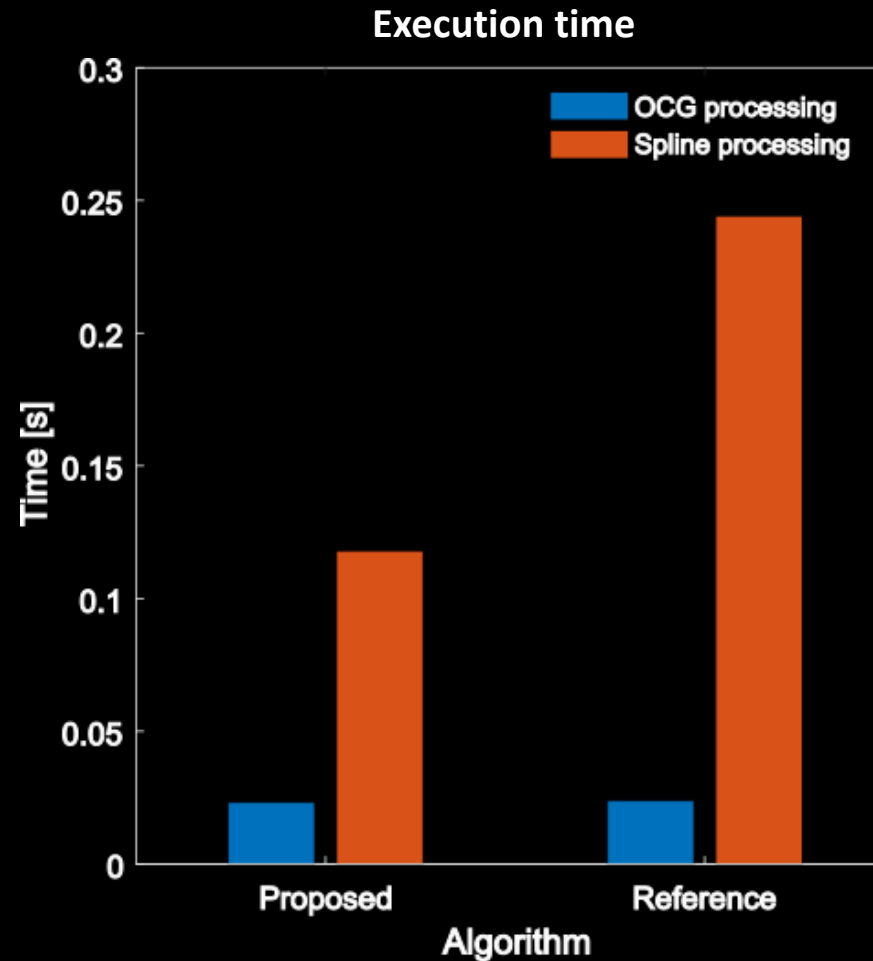


Approximation errors box plot
(Hausdorff distance)



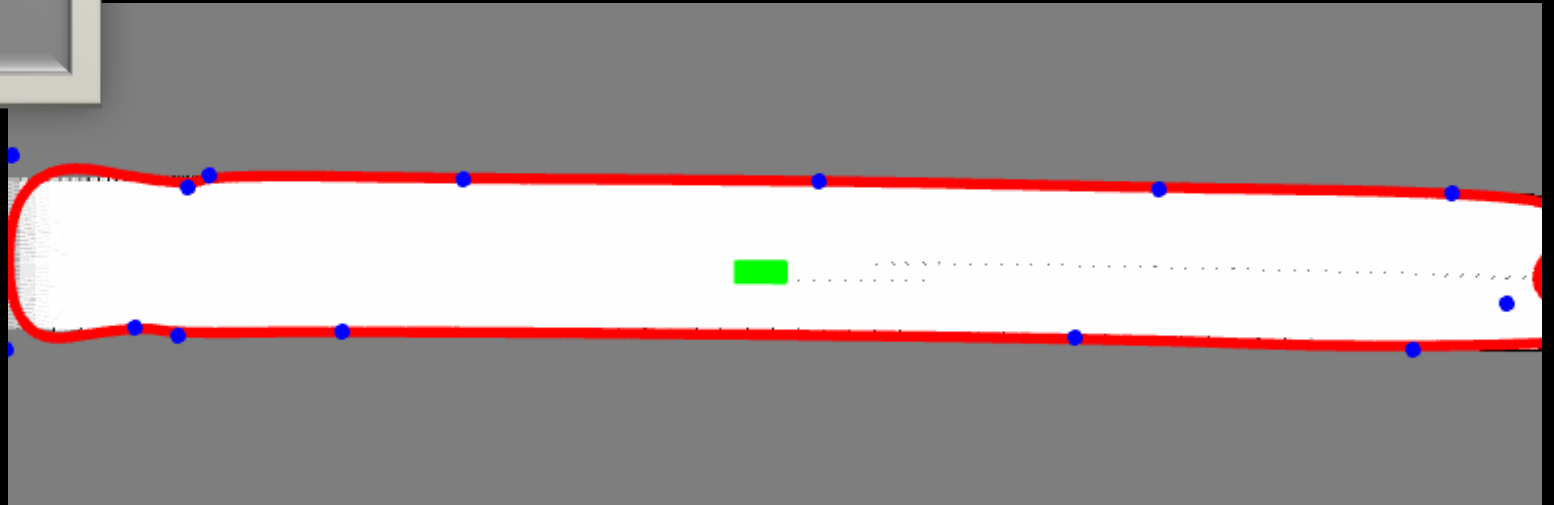
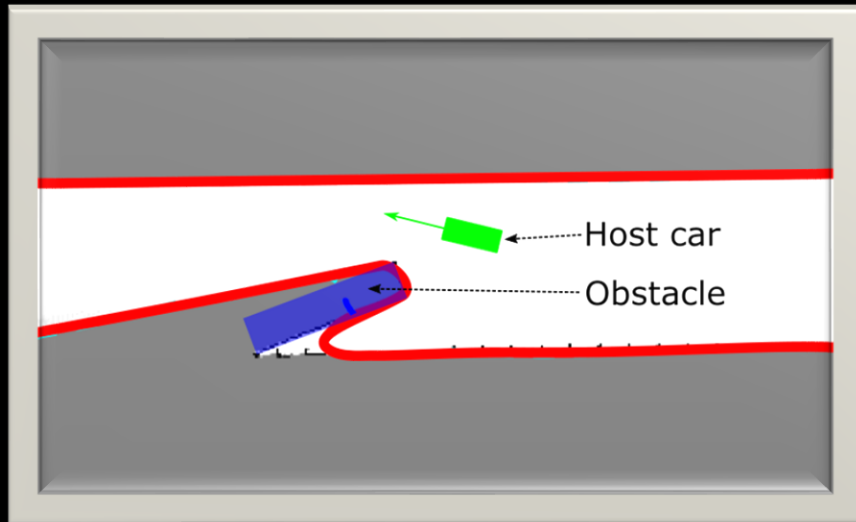
Testy i weryfikacja

(wyniki ogólne – czas wykonania)



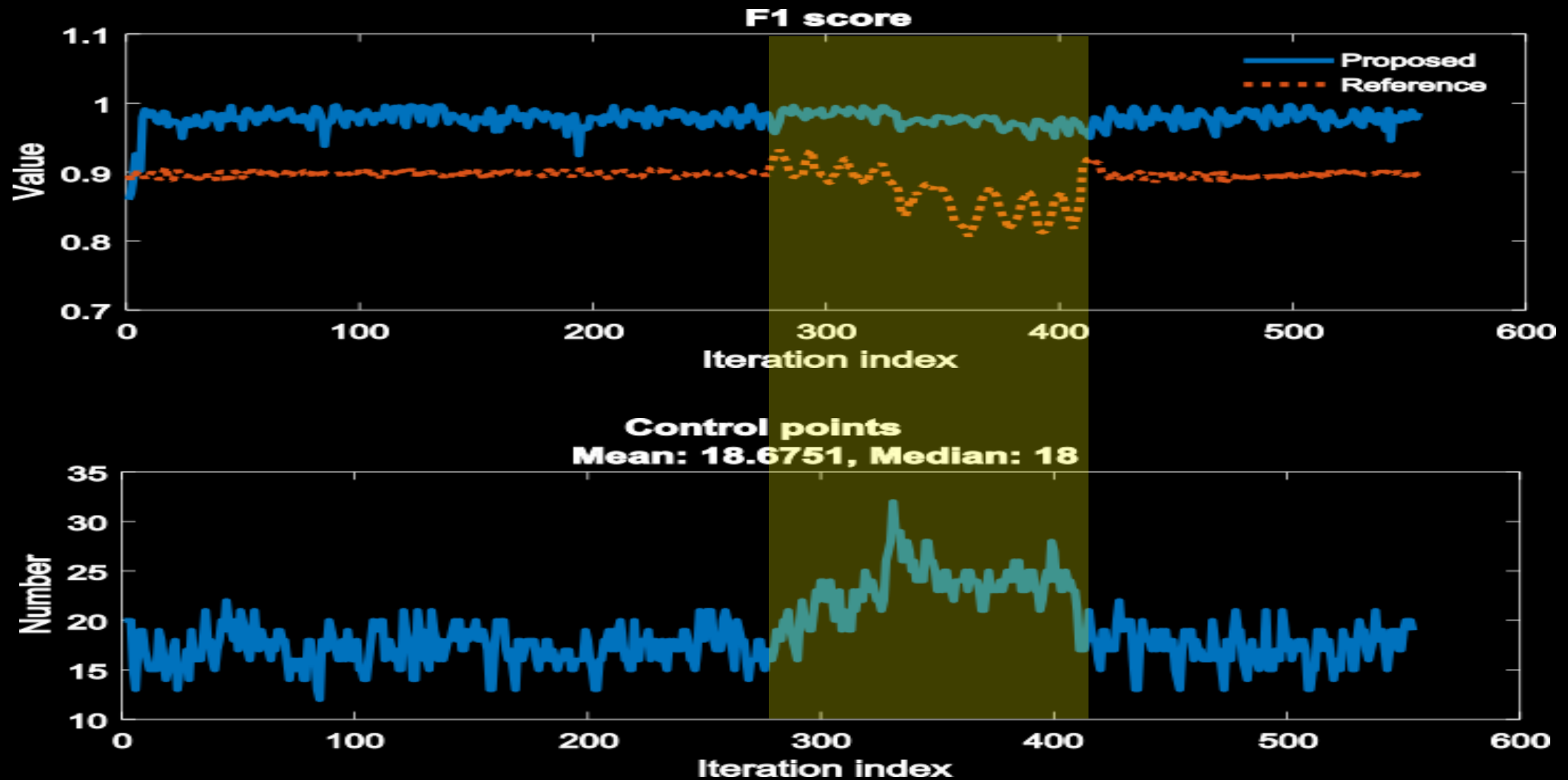
Testy i weryfikacja

(wyniki szczegółowe)



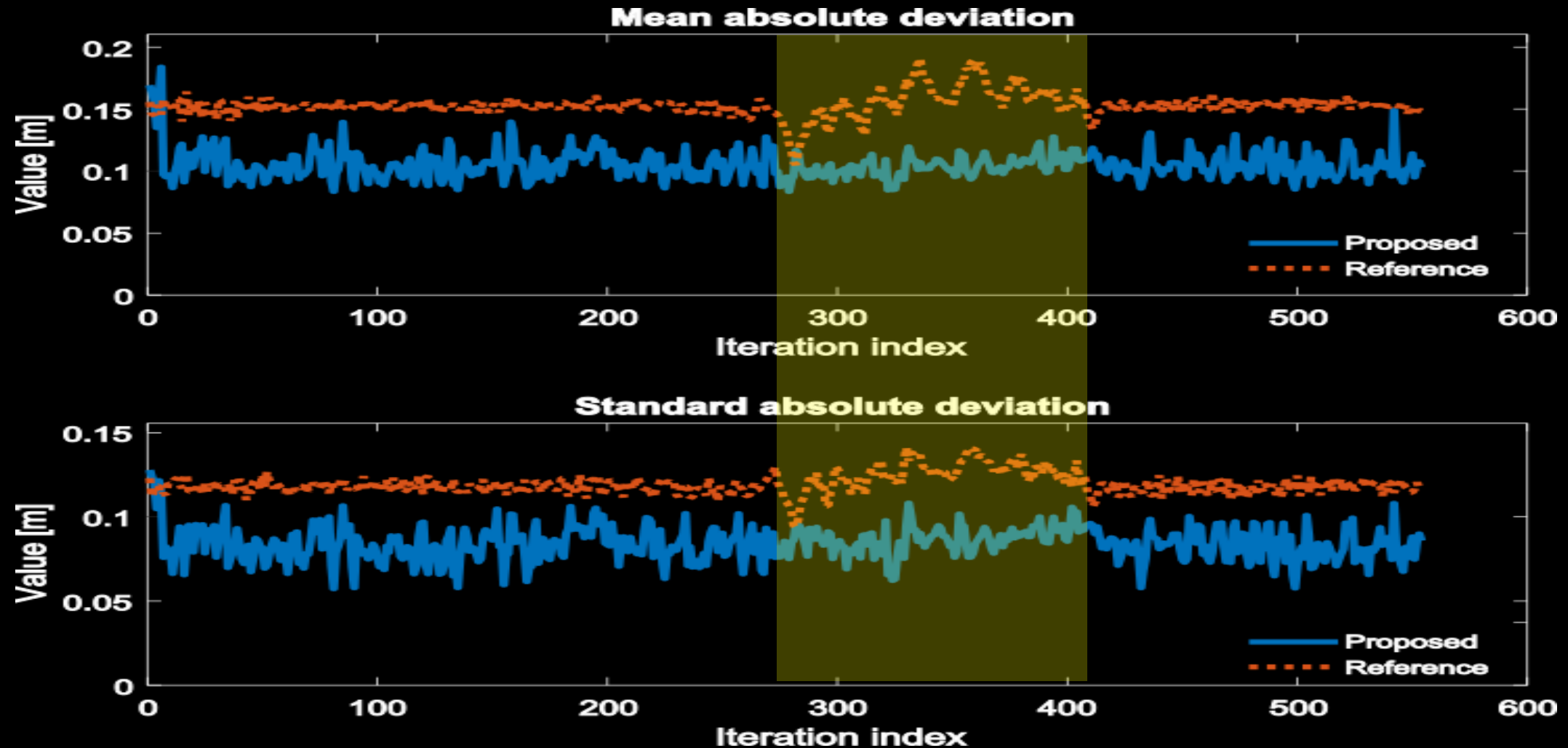
Testy i weryfikacja

(wyniki szczegółowe - klasyfikacja)



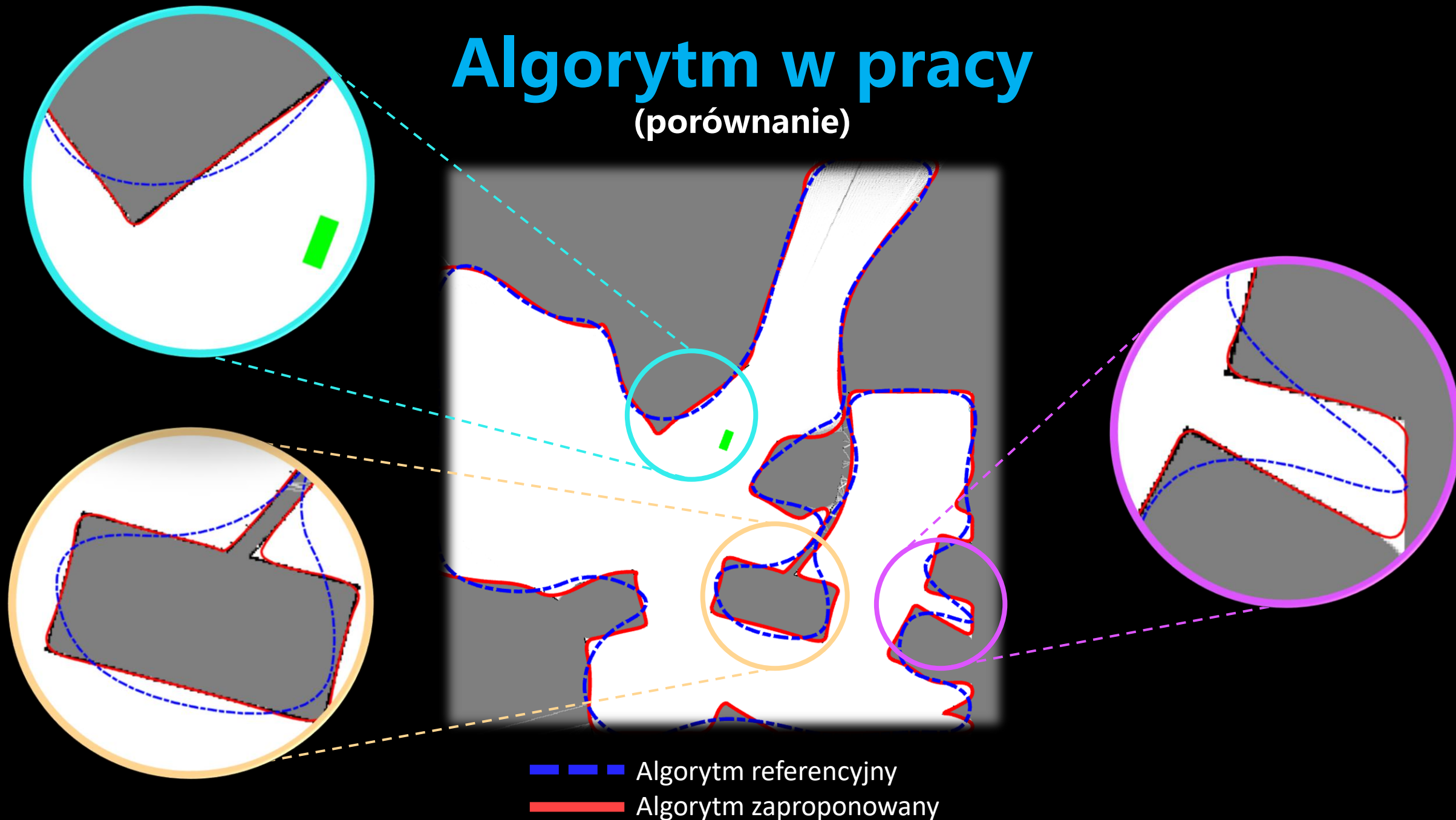
Testy i weryfikacja

(wyniki szczegółowe - aproksymacja)



Algorytm w pracy

(porównanie)



Bibliografia

- Zdjęcie APTIV - <https://www.fool.com/investing/2019/08/06/heres-why-aptiv-is-a-no-brainer-long-term-investme.aspx>
- Zdjęcie AGH - https://www.facebook.com/AGH.Krakow/photos/a.419738800661/10158441566940662/?paipv=0&eav=Afb0rrzgs6JluOjop0rEpRX2xruQCMbA0-QAvrx9iQchfM8ohyA2tLo6NHv-_1TdsGc&_rdr
- System samochodowy - sensory - N. Z, A. G, W. B, and P. S. TI Gives Sight to Vision-Enabled Automotive Technologies. Texas Instruments, October 2013.
- System samochodowy – percepcja - https://media.licdn.com/dms/image/v2/D4D12AQFTaPKUGRdYWg/article-cover_image-shrink_720_1280/article-cover_image-shrink_720_1280/0/1660739209950?e=2147483647&v=beta&t=IBnunnMrCOonLBdvAbCrKrKfs9ezjC6pe7kbpTJzFQLo
- System samochodowy – planowanie - https://miro.medium.com/v2/resize:fit:1108/1*ufWDxL-5ogd22Rg_37rakw.png

Dziękuję za uwagę!

Q&A