

Algoritmi avansați

C8 - Acoperiri convexe

Mihai-Sorin Stupariu

Sem. al II-lea, 2024 - 2025

Introducere

Criterii numerice. Raport și test de orientare

Acoperiri convexe

Introducere

- ▶ Algoritmii geometrici sunt legați de Geometria Computațională: *complexitatea computațională a problemelor geometrice în contextul analizei algoritmilor* [Lee & Preparata, 1984]
- ▶ Problemă (exemplu):



Cum poate fi deplasat discul din A în B fără a atinge obstacolele?

- ▶ Complexitatea: memorie, timp, calcule
- ▶ Probleme abordate: acoperiri convexe, proximitate, intersecții, căutare, etc.
- ▶ Tehnici utilizate: construcții incrementale, divide et impera, plane-sweep, transformări geometrice, etc.

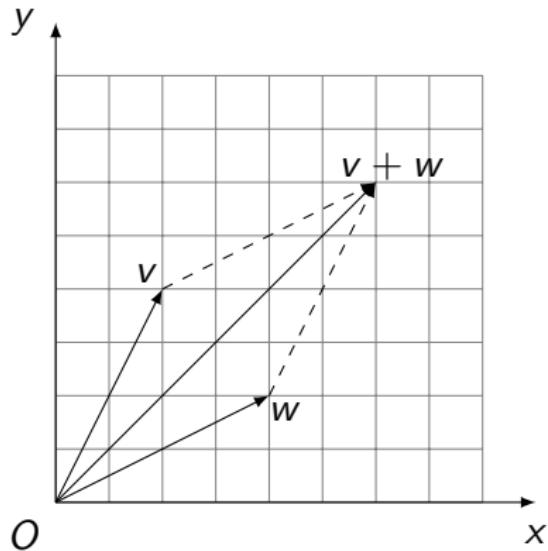
Introducere

- ▶ Note istorice:
 - ▶ Ideea de construcție geometrică realizată într-un număr finit de pași: [Elementele lui Euclid](#)
 - ▶ Abordare numerică - sistem de coordonate în plan: Descartes (sec. XVII)
 - ▶ “[Simplicitatea” construcțiilor geometrice](#): Lemoine (~ 1900)
 - ▶ a doua jumătate a sec. XX: formularea / rezolvarea unor probleme de GC; în 1975 este folosit prima dată termenul de *Computational Geometry* (M.I. Shamos, “Geometric Complexity”, Proc. 7th ACM Annual Symposium on Theory of Computing)
- ▶ Domenii de aplicabilitate: grafică pe calculator, pattern recognition, robotică, statistică, gestionarea bazelor de date numerice, cercetări operaționale

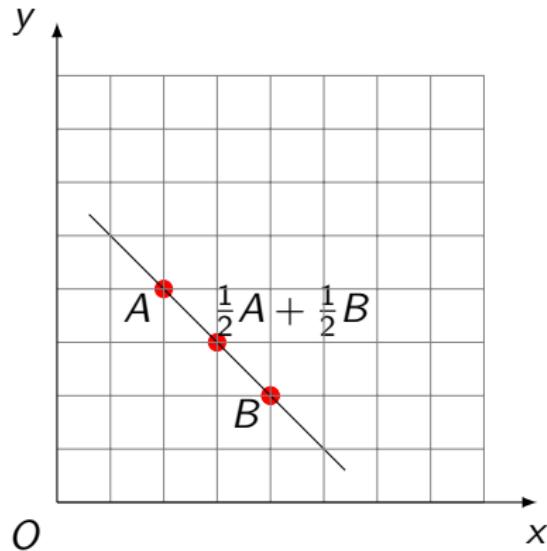
Criterii numerice – poziția relativă a unor puncte

- ▶ Stabilirea unor relații între puncte / ordonare
- ▶ **Context 1D**
 - ▶ ordonare (**relativ la un sistem de coordonate**)
 - ▶ raport (**independent de alegerea unui sistem de coordonate**)
- ▶ **Context 2D**
 - ▶ ordonare (**relativ la un sistem de coordonate** – posibile alegeri: coordonate carteziene, coordonate polare)
 - ▶ testul de orientare (**independent de alegerea unui sistem cartezian de coordonate**)

Vectori și puncte



Combinații liniare
 $\alpha v + \beta w$ ($\alpha, \beta \in \mathbb{R}$)



Combinații afine
 $\lambda A + \mu B$ ($\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ și $\lambda + \mu = 1$)

Conceptul de raport

- ▶ **Lemă** Fie A și B două puncte distincte în \mathbb{R}^n . Pentru orice punct $P \in AB$, $P \neq B$ există un unic scalar $r \in \mathbb{R} \setminus \{-1\}$ astfel ca $\overrightarrow{AP} = r \overrightarrow{PB}$. Reciproc, fiecărui scalar $r \in \mathbb{R} \setminus \{-1\}$, îi corespunde un unic punct $P \in AB$.
- ▶ **Definiție** Scalarul r definit în lema anterioară se numește **raportul** punctelor A, B, P (sau **raportul în care punctul P împarte segmentul $[AB]$**) și este notat cu $r(A, P, B)$.



$$\overrightarrow{AP} = r \overrightarrow{PB}, r > 0$$



$$\overrightarrow{AP} = r \overrightarrow{PB}, r < 0$$

- ▶ **Observație importantă.** În calcularea raportului, ordinea punctelor este esențială. Modul în care este definită această noțiune (mai precis ordinea în care sunt considerate punctele) diferă de la autor la autor.

Raport- exemple

- (i) În \mathbb{R}^2 considerăm punctele $A = (1, 1)$, $B = (2, 2)$, $C = (7, 7)$. Determinăm raportul $r(A, B, C)$.

$$r = ? \text{ a.î. } \overrightarrow{AB} = r \overrightarrow{BC}.$$

$$\overrightarrow{AB} = B - A = (x_B - x_A, y_B - y_A) = (1, 1)$$

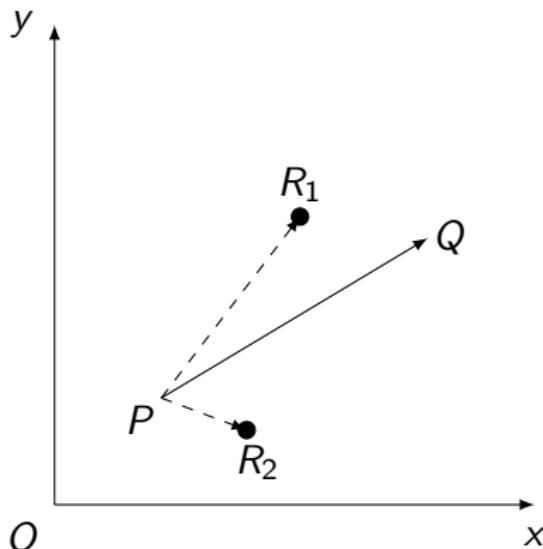
$$\overrightarrow{BC} = C - B = (x_C - x_B, y_C - y_B) = (5, 5)$$

$$\overrightarrow{AB} = \frac{1}{5} \overrightarrow{BC}, \text{ deci } r(A, B, C) = \frac{1}{5}.$$

Raport- exemple

- (ii) În \mathbb{R}^3 considerăm punctele $A = (1, 2, 3)$, $B = (2, 1, -1)$, $C = (0, 3, 7)$. Atunci punctele A, B, C sunt coliniare și avem $r(A, C, B) = -\frac{1}{2}$, $r(B, C, A) = -2$, $r(C, A, B) = 1$, $r(C, B, A) = -2$.
- (iii) Fie A, B două puncte din \mathbb{R}^n și $M = \frac{1}{2}A + \frac{1}{2}B$. Atunci $r(A, M, B) = 1$, $r(M, A, B) = -\frac{1}{2}$.

Testul de orientare - motivație



Poziția relativă a două puncte față de un vector / o muchie orientată

Enunț principal

- **Propoziție.** Fie $P = (p_1, p_2)$, $Q = (q_1, q_2)$ două puncte distincte din planul \mathbf{R}^2 , fie $R = (r_1, r_2)$ un punct arbitrar și

$$\Delta(P, Q, R) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ p_1 & q_1 & r_1 \\ p_2 & q_2 & r_2 \end{vmatrix}.$$

Atunci R este situat:

- (i) pe dreapta $PQ \Leftrightarrow \Delta(P, Q, R) = 0$ ("ecuația dreptei");
- (ii) "în dreapta" segmentului orientat $\overrightarrow{PQ} \Leftrightarrow \Delta(P, Q, R) < 0$;
- (iii) "în stânga" segmentului orientat $\overrightarrow{PQ} \Leftrightarrow \Delta(P, Q, R) > 0$.

- **Obs.** Testul de orientare se bazează pe calculul unui polinom de gradul II ($\Delta(P, Q, R)$).

Testul de orientare - exemplu

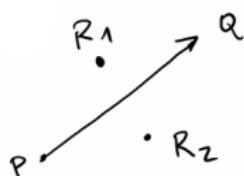


Avem

$$\Delta(A, B, C) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1 > 0,$$

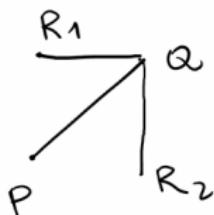
deci conform criteriului (testului de orientare) punctul C este în
stânga segmentului orientat \overrightarrow{AB} .

Aplicații



(a)

(b)



(c)



(d)



- (a) dacă un punct este în dreapta / stânga unei muchii orientate;
- (b) dacă două puncte sunt de o parte și de alta a unui segment / a unei drepte;
- (c) natura unui viraj în parcurgerea unei linii poligonale (la dreapta / la stânga);
- (d) natura unui poligon (convex / concav).

Limitări - robustețe și erori de rotunjire

L. Kettner et al. / Computational Geometry 40 (2008) 61–78

65

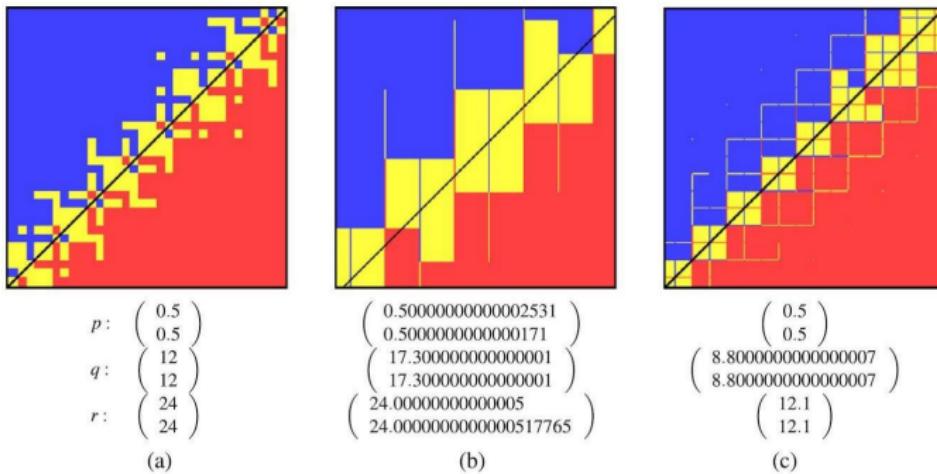


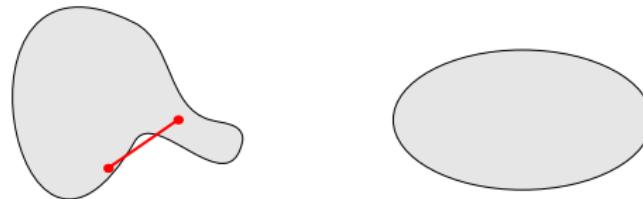
Fig. 2. The weird geometry of the float-orientation predicate: The figure shows the results of $float_orient(p_x + Xu_x, p_y + Yu_y, q, r)$ for $0 \leq X, Y \leq 255$, where $u_x = u_y = 2^{-53}$ is the increment between adjacent floating-point numbers in the considered range. The result is color coded: Yellow (red, blue, resp.) pixels represent collinear (negative, positive, resp.) orientation. The line through q and r is shown in black.

Sursa: Kettner et al, *Classroom examples of robustness problems in geometric computations*, 2008

Mulțimi convexe: generalități

► Conceptul de mulțime convexă:

O mulțime $M \subset \mathbf{R}^m$ este convexă dacă oricare ar fi $p, q \in M$, segmentul $[pq]$ este inclus în M .

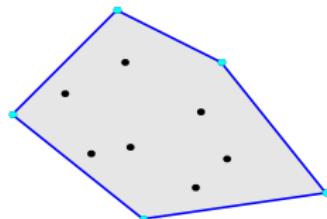


Mulțimea din stânga nu este convexă, întrucât **există** două puncte, pentru care segmentul determinat nu este inclus în mulțime (punctele cu această proprietate nu sunt unice!).

► Problematizare:

Mulțimile finite cu cel puțin două elemente nu sunt convexe \longrightarrow necesară **acoperirea convexă**.

Acoperire convexă a unei multimi finite \mathcal{P} : concept



- ▶ Caracterizări echivalente:
 - ▶ Cea mai "mică" (în sensul incluziunii) mulțime convexă care conține \mathcal{P} .
 - ▶ Intersecția tuturor mulțimilor convexe care conțin \mathcal{P} .
 - ▶ Mulțimea tuturor combinațiilor convexe ale punctelor din \mathcal{P} . O **combinație convexă** a punctelor P_1, P_2, \dots, P_n este un punct P de forma

$$P = \alpha_1 P_1 + \dots + \alpha_n P_n, \quad \alpha_1, \dots, \alpha_n \in [0, 1], \quad \alpha_1 + \dots + \alpha_n = 1.$$

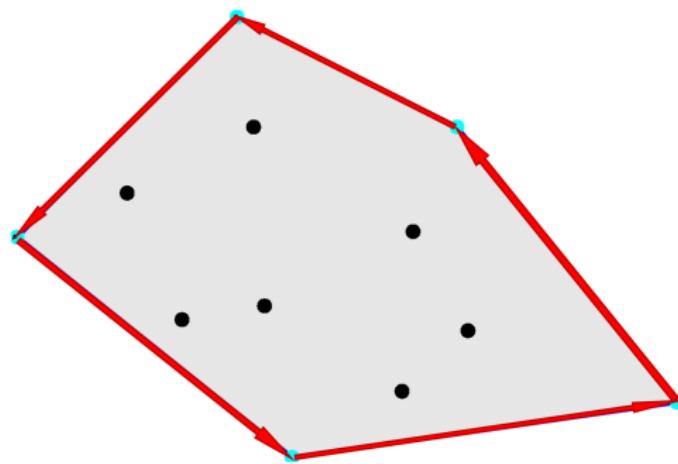
- ▶ **Problematizare:** Aceste caracterizări echivalente nu conduc la un algoritm de determinare a acoperirii convexe.

Acoperire convexă a unei multimi finite \mathcal{P} : problematizare

- ▶ Dacă $\mathcal{P} \subset \mathbb{R}^d$ este finită, acoperirea sa convexă, $\text{Conv}(\mathcal{P})$ este un **politop convex**.
- ▶ Cazuri particulare: $d = 1$ (segment); $d = 2$ (poligon); $d = 3$ (poliedru).
- ▶ Cazul $d = 1$: acoperirea convexă este un segment; algoritmic: parcursere a punctelor (complexitate $O(n)$).
- ▶ În continuare: $d = 2$.

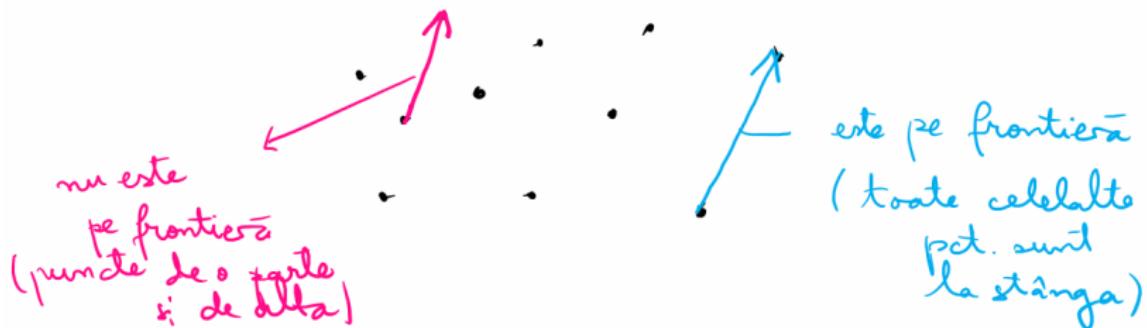
Acoperire convexă a unei multimi finite \mathcal{P} (practic)

- De fapt, dacă \mathcal{P} este finită, acoperirea sa convexă, $\text{Conv}(\mathcal{P})$ este un poligon convex.



- **Problemă:**
Cum determinăm, algoritmic, vârfurile acestui poligon?
- **Convenție:** Sensul de parcursare a frontierei este cel trigonometric.

Un algoritm "lent": idee de lucru



Sunt considerate **muchiiile orientate**.

- ▶ **Q:** Cum se decide dacă o muchie orientată fixată este pe **frontieră**?
- ▶ **A:** Toate celelalte puncte sunt "în stanga" ei (v. "testul de orientare").

Un algoritm lent

Input: O mulțime de puncte \mathcal{P} din \mathbb{R}^2 .

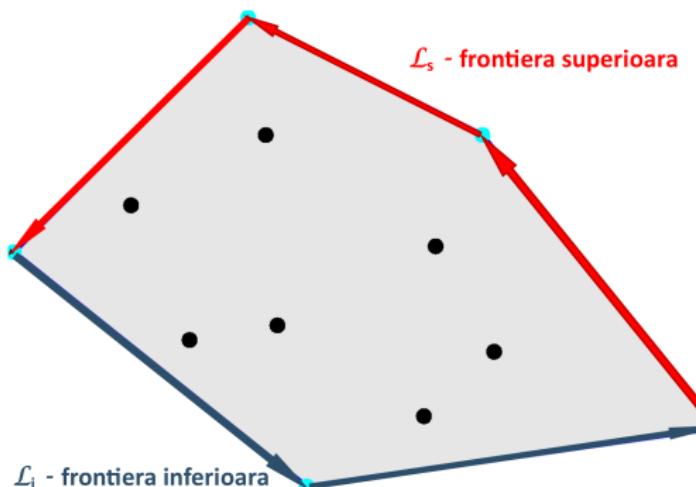
Output: O listă \mathcal{L} care conține vârfurile ce determină frontieră acoperirii convexe, parcursă în sensul trigonometric.

1. $E \leftarrow \emptyset, \mathcal{L} \leftarrow \emptyset$ /* E este lista muchiilor orientate*/
2. **for** $(P, Q) \in \mathcal{P} \times \mathcal{P}$ cu $P \neq Q$
3. **do** $valid \leftarrow \text{true}$
4. **for** $R \in \mathcal{P} \setminus \{P, Q\}$
5. **do if** R "în dreapta" lui \overrightarrow{PQ}
6. **then** $valid \leftarrow \text{false}$
7. **if** $valid = \text{true}$ **then** $E = E \cup \{\overrightarrow{PQ}\}$
8. din E se construiește lista \mathcal{L} a vârfurilor acoperirii convexe /*este necesar ca E să fie **coerentă***/

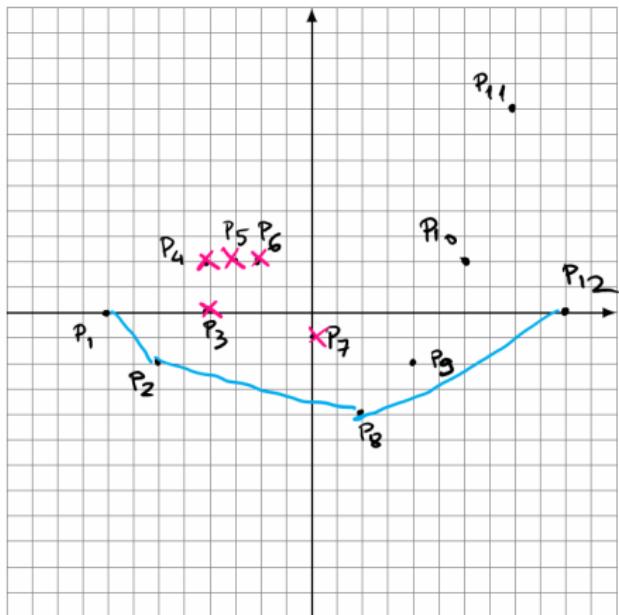
Algoritmul "lent": comentarii

- ▶ Complexitatea: $O(n^3)$
- ▶ Complexitate algebrică: polinoame de gradul II
- ▶ Tratarea cazurilor degenerate: poate fi adaptat.
- ▶ Robustețea: datorită erorilor de rotunjire este posibil ca algoritmul să nu returneze o listă coerentă de muchii.

Graham's scan, varianta Andrew: idee de lucru



- ▶ Punctele sunt mai întâi sortate și renumerate **lexicografic**.
- ▶ Algoritmul este de tip **incremental**, punctele fiind adăugate unul câte unul, fiind apoi eliminate anumite puncte.
- ▶ **Q:** Cum se decide dacă trei puncte sunt vârfuri consecutive ale acoperirii convexe?
- ▶ **A:** Se efectuează un "viraj la stânga" în punctul din mijloc.



$P_1 = (-8, 0)$; $P_2 = (-6, -2)$; $P_3 = (-4, 0)$;
 $P_4 = (-4, 2)$; $P_5 = (-3, 2)$; $P_6 = (-2, 2)$;
 $P_7 = (0, -1)$; $P_8 = (2, -4)$; $P_9 = (4, -2)$
 $P_{10} = (6, 2)$; $P_{11} = (8, 8)$; $P_{12} = (10, 0)$

Cum evoluază ℓ_i pe parcursul

Graham's scan - varianta Andrew.

$P_1 P_2$

$P_1 P_2 P_3$

$P_1 P_2 P_3 P_4 P_5$

$P_1 P_2 P_3 P_4 P_6$

viraj la dreapta
în P_4

viraj la stânga în P_5

P_2, P_3, P_6 coliniare

$P_1 P_2 P_6 P_7$

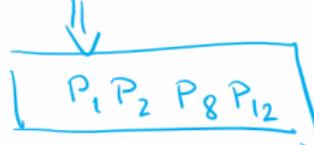
viraj dr. P_6

$P_1 P_2 P_7 P_8$

viraj dr. P_7

$P_1 P_2 P_8 P_9 P_{10} P_{11} P_{12}$

viraj e dr.
 P_{11}, P_{10}, P_9



frontiera
inferioară

Graham's scan, varianta Andrew (algoritm)

Input: O mulțime de puncte \mathcal{P} din \mathbb{R}^2 .

Output: O listă \mathcal{L} care conține vârfurile ce determină frontiera acoperirii convexe, parcursă în sens trigonometric.

1. Sortare lexicografică, renumerotare P_1, P_2, \dots, P_n conform ordonării
2. $\mathcal{L} \leftarrow (P_1, P_2)$
3. **for** $i \leftarrow 3$ **to** n
4. **do** adaugă P_i la sfârșitul lui \mathcal{L}
5. **while** \mathcal{L} are mai mult de două puncte
 and ultimele trei nu determină un viraj la stânga
6. **do** șterge penultimul punct
7. **return** \mathcal{L}_i
8. Parcurge pași analogi pentru a determina \mathcal{L}_s
9. Concatenează \mathcal{L}_i și \mathcal{L}_s

Graham's scan, varianta Andrew: comentarii

- ▶ Complexitatea: $O(n \log n)$.
- ▶ Tratarea cazurilor degenerate: corect.
- ▶ Robustețea: datorită erorilor de rotunjire este posibil ca algoritmul să returneze o listă eronată (dar coerentă) de muchii.

Jarvis' march / Jarvis' wrap [1973]

- ▶ Algoritm de tip **incremental**. Nu necesită sortare prealabilă.
- ▶ Inițializare: un punct care este sigur un vârf al acoperirii convexe (e.g. punctul cel mai de jos / din stânga / stânga jos).
- ▶ Lista se actualizează prin determinarea succesorului: "cel mai la dreapta" punct.
- ▶ Implementare: două abordări (i) ordonare; (ii) testul de orientare.
- ▶ Complexitate: $O(hn)$, unde h este numărul punctelor de pe frontieră acoperirii convexe.
- ▶ **Algoritmul lui Chan** "combină" ideile celor doi algoritmi, ajungând la complexitatea-timp $O(n \log h)$.

Jarvis' march (algoritm)

Input: O mulțime de puncte necoliniare $\mathcal{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ din \mathbf{R}^2 ($n \geq 3$).

Output: O listă \mathcal{L} care conține vârfurile ce determină frontieră acoperirii convexe, parcursă în sens trigonometric.

1. Determinarea unui punct din \mathcal{P} care aparține frontierei (de exemplu cel mai mic, folosind ordinea lexicografică); acest punct este notat cu A_1 .
2. $k \leftarrow 1$; $\mathcal{L} \leftarrow (A_1)$; $valid \leftarrow \text{true}$
3. **while** $valid = \text{true}$
4. **do** alege un pivot arbitrar $S \in \mathcal{P}$, diferit de A_k
5. **for** $i \leftarrow 1$ **to** n
6. **do if** P_i este la dreapta muchiei orientate $A_k S$
7. **then** $S \leftarrow P_i$
8. **if** $S \neq A_1$
9. **then** $k \leftarrow k + 1$;
 $A_k = S$
 adaugă A_k la \mathcal{L}
10. **else** $valid \leftarrow \text{false}$
11. **return** \mathcal{L}

Alte direcții de lucru

- ▶ **Aplicații:** grafică pe calculator, robotică, GIS, recunoașterea formelor, gestionarea bazelor de date multi-dimensionale, etc.
- ▶ Pot fi stabilite legături cu algoritmi studiați în alt context. De exemplu: *Traveling Salesman Problem*, [în context euclidian](#) (costurile sunt date de distanțele dintre puncte). În acest caz, ordinea în care nodurile de pe frontieră apar în traseul optim coincide cu ordinea în care acestea apar în parcurgerea frontierei acoperirii convexe - [exemplu](#).
- ▶ Algoritmi pentru spații euclidiene de dimensiune $m \geq 3$.
- ▶ Algoritmi eficienți pentru determinarea acoperirii convexe pentru vârfurile unui poligon arbitrar.
- ▶ Algoritmi dinamici (on-line, real-time, convex hull maintenance).

Algoritmi avansați

C9 - Triangularea poligoanelor

Mihai-Sorin Stupariu

Sem. al II-lea, 2024 - 2025

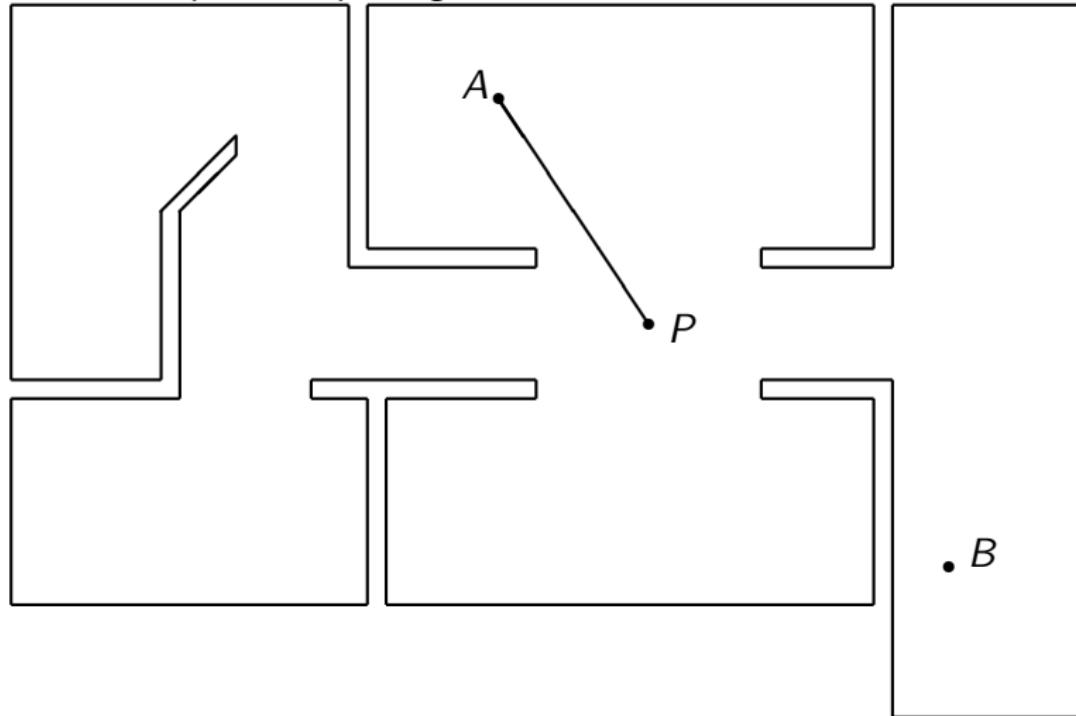
Problema galeriei de artă

Algoritmi de triangulare - “Ear clipping”

Triangularea poligoanelor - un algoritm eficient

Supravegherea unei galerii de artă

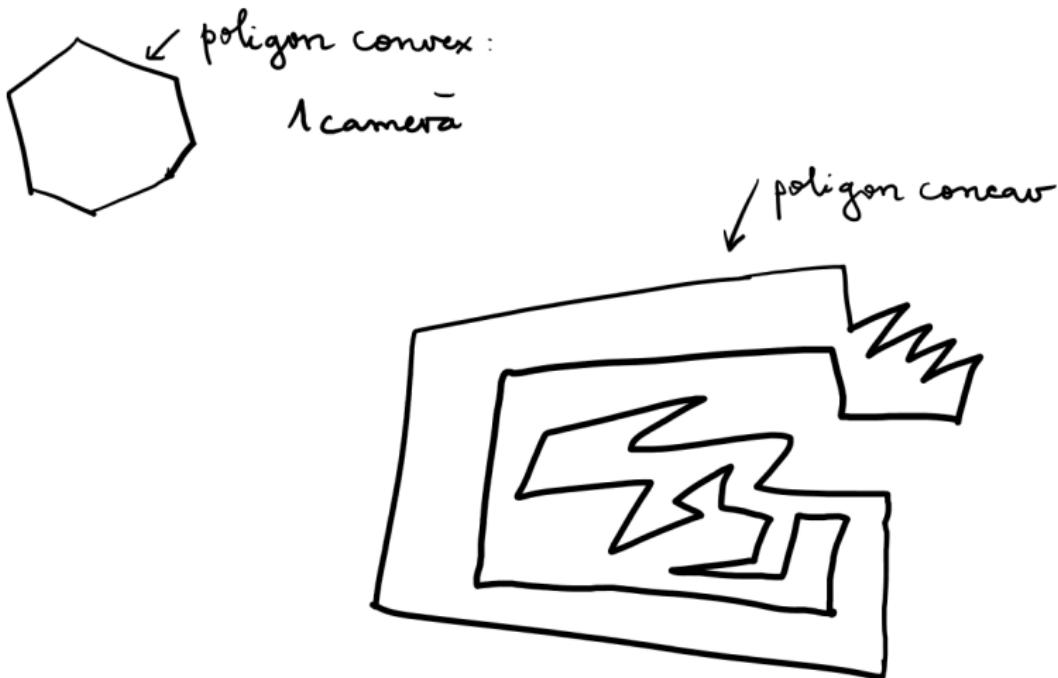
Camera din P poate supraveghea A , dar nu B .



Formalizare

- ▶ O galerie de artă poate fi interpretată (în contextul acestei probleme) ca un poligon \mathcal{P} (adică o linie poligonală fără autointersecții) având n vârfuri.
- ▶ O cameră video (vizibilitate 360^0) poate fi identificată cu un punct din interiorul lui \mathcal{P} ; ea poate supraveghea acele puncte cu care poate fi unită printr-un segment inclus în interiorul poligonului.
- ▶ **Problema galeriei de artă:** *câte camere video sunt necesare pentru a supraveghea o galerie de artă și unde trebuie amplasate acestea?*

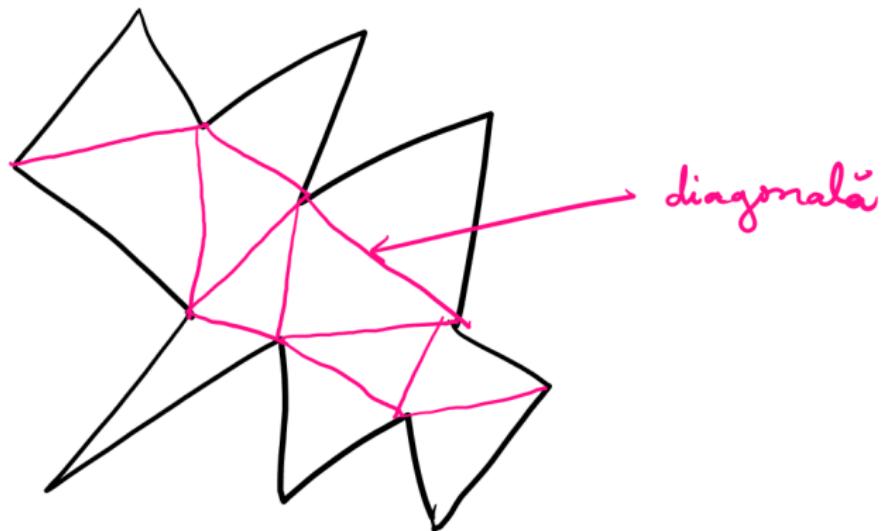
Comentarii



Numărul de camere vs. forma poligonului

- ▶ Se dorește exprimarea numărului de camere necesare pentru supraveghere în funcție de n (sau controlarea acestuia de către n).
- ▶ Pentru a supraveghea un spațiu având forma unui poligon convex, este suficientă o singură cameră.
- ▶ Numărul de camere depinde și de forma poligonului: cu cât forma este mai "complexă", cu atât numărul de camere va fi mai mare.
- ▶ **Principiu:** Poligonul considerat: descompus în triunghiuri (triangulare).

Despre triangulări



Definiție formală

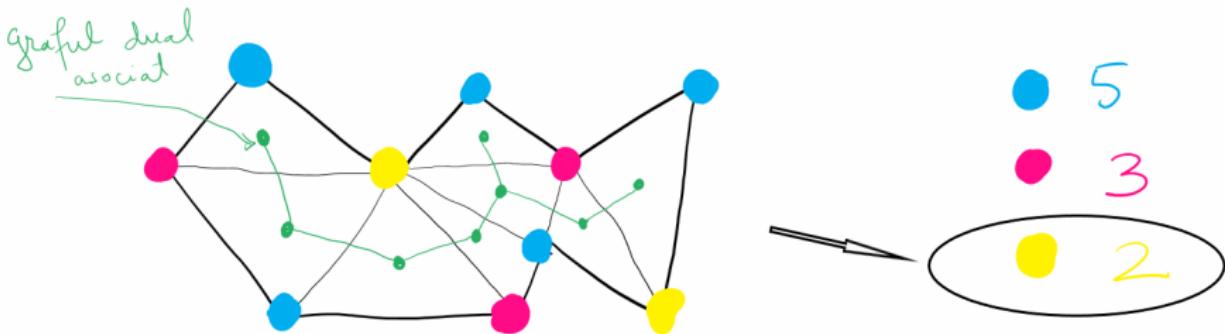
- ▶ Fie \mathcal{P} un poligon plan.
- ▶ (i) O **diagonală** a lui \mathcal{P} este un segment ce unește două vârfuri ale acestuia și care este situat în interiorul lui \mathcal{P} .
- ▶ (ii) O **triangulare** $\mathcal{T}_{\mathcal{P}}$ a lui \mathcal{P} este o descompunere a lui \mathcal{P} în triunghiuri, dată de o mulțime maximală de diagonale ce nu se intersectează.

Rezultate

- ▶ **Lemă.** Orice poligon admite o diagonală.
- ▶ **Teoremă.** *Orice poligon admite o triangulare. Orice triangulare a unui poligon cu n vârfuri conține exact $n - 2$ triunghiuri.*

Rezolvarea problemei galeriei de artă

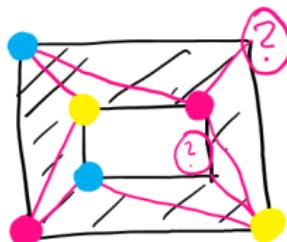
- ▶ Amplasarea camerelor se poate face în vârfurile poligonului.
- ▶ Date o pereche $(\mathcal{P}, \mathcal{T}_P)$ se consideră o 3-colorare a acesteia: fiecărui vârf îi corespunde o culoare dintr-un set de 3 culori și pentru fiecare triunghi, cele 3 vârfuri au culori distincte.
- ▶ **Observație.** Dacă \mathcal{P} este linie poligonală fără autointersecții o astfel de colorare există, deoarece graful dual asociat perechii $(\mathcal{P}, \mathcal{T}_P)$ este arbore.



Rezolvarea problemei galeriei de artă

- ▶ Amplasarea camerelor se poate face în vârfurile poligonului.
- ▶ Date o pereche $(\mathcal{P}, \mathcal{T}_P)$ se consideră o 3-colorare a acesteia: fiecărui vârf îi corespunde o culoare dintr-un set de 3 culori și pentru fiecare triunghi, cele 3 vârfuri au culori distincte.
- ▶ **Observație.** Dacă \mathcal{P} este linie poligonală fără autointersecții o astfel de colorare există, deoarece graful dual asociat perechii $(\mathcal{P}, \mathcal{T}_P)$ este arbore.

Contraexemplu - 3 colorare

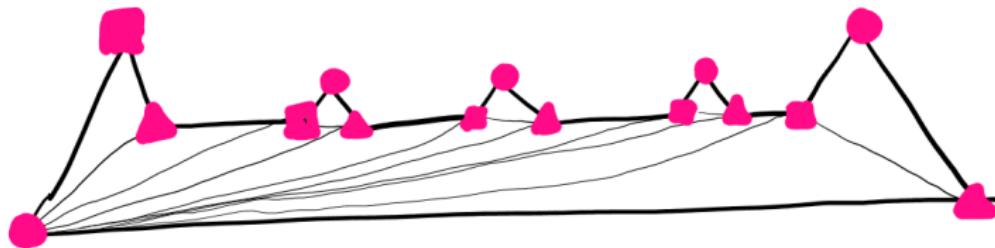


Teorema galeriei de artă

- ▶ **Teoremă.** [Chvátal, 1975; Fisk, 1978] Pentru un poligon cu n vârfuri, $\left[\frac{n}{3}\right]$ camere sunt **uneori necesare** și întotdeauna **suficiente** pentru ca fiecare punct al poligonului să fie vizibil din cel puțin una din camere.
- ▶ Despre Teorema Galeriei de Artă: J. O'Rourke, *Art Gallery Theorems and Algorithms*; J. Urrutia, *Art Gallery and Illumination Problems*
- ▶ Despre numărul de culori utilizat: L. Erickson, S. LaValle, *A chromatic art gallery problem*, Fekete et al., *On the Chromatic Art Gallery Problem*

Teorema galeriei de artă - justificare, exemplu

- “uneori necesare”



●	5
■	5
▲	5

Teorema galeriei de artă - justificare, exemplu

- “întotdeauna suficiente”

Notăm cu n_1, n_2, n_3 numărul de vârfuri colorate cu cele 3 culori, are loc relația $n_1 + n_2 + n_3 = n$.

Presupunem prin absurd ca nu sunt suficiente $\left[\frac{n}{3}\right]$ camere. Aceasta înseamnă că:

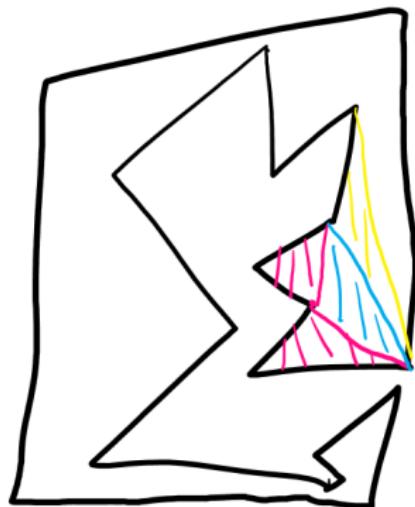
$$n_1 > \left[\frac{n}{3}\right] \Rightarrow n_1 > \frac{n}{3} \quad (\text{folosind definiția părții întregi})$$

$$n_2 > \left[\frac{n}{3}\right] \Rightarrow n_2 > \frac{n}{3} \quad (\text{folosind definiția părții întregi})$$

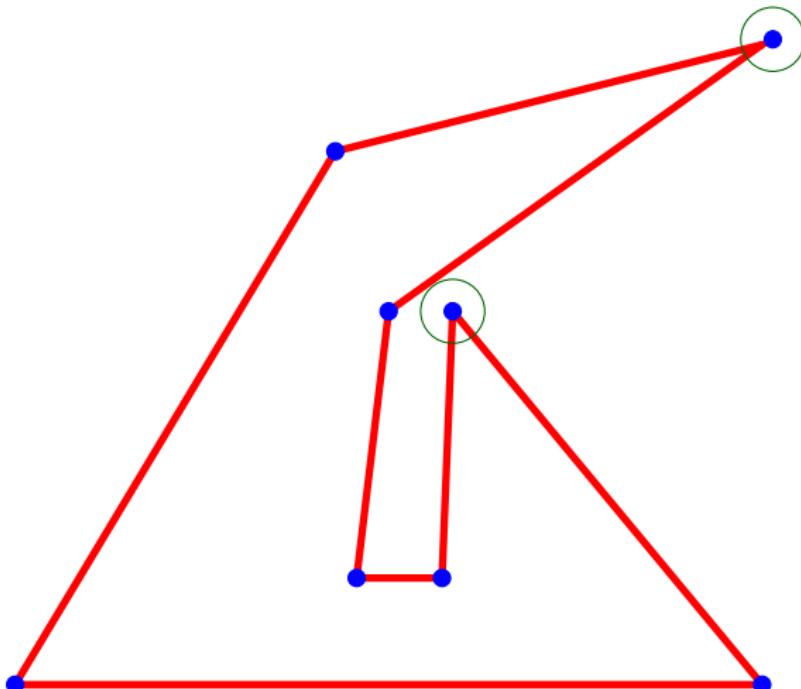
$$n_3 > \left[\frac{n}{3}\right] \Rightarrow n_3 > \frac{n}{3} \quad (\text{folosind definiția părții întregi})$$

Adunând relațiile obținute se ajunge la relația $n_1 + n_2 + n_3 > n$, ceea ce reprezintă o contradicție. În concluzie, există i astfel ca $n_i \leq \left[\frac{n}{3}\right]$.

Triangularea unui poligon - intuiție

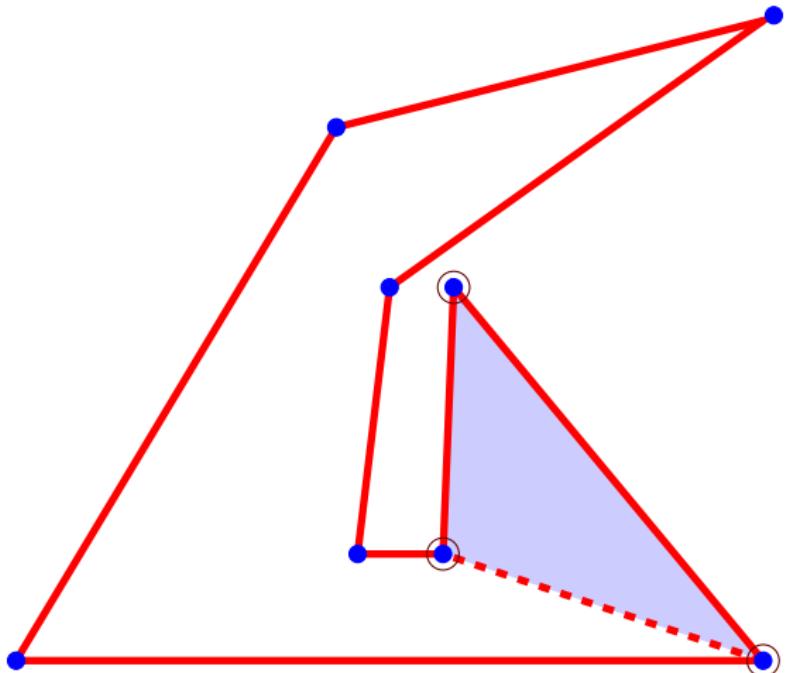


Triangularea unui poligon - algoritmul “Ear clipping”



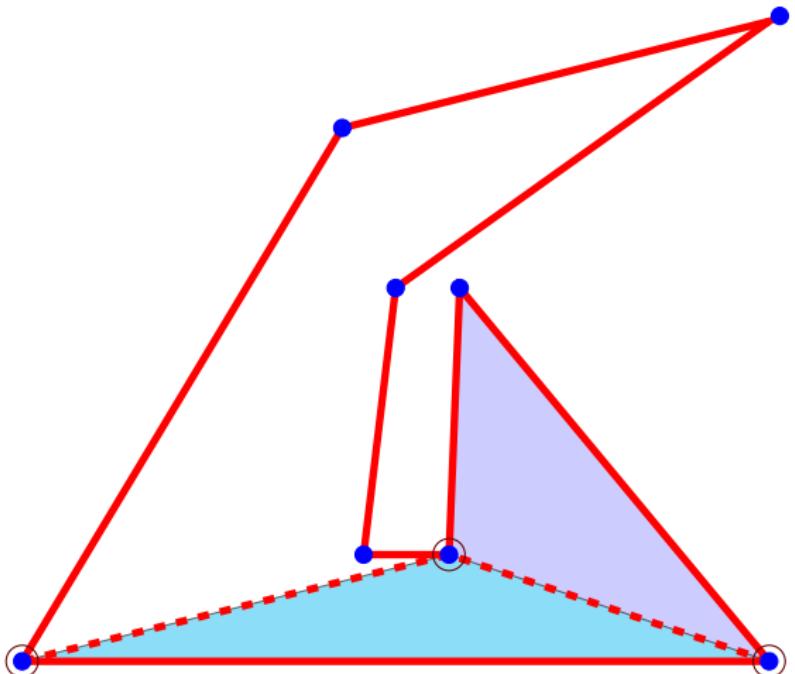
Vârfuri care pot fi selectate pentru start.

Triangularea unui poligon - algoritmul “Ear clipping”



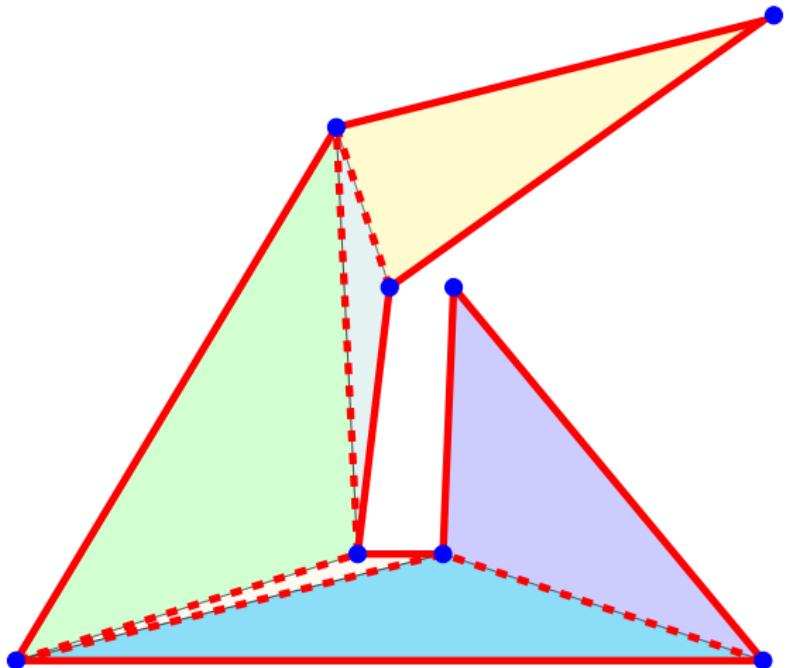
Ales un vârf, este considerat triunghiul determinat cu predecesorul și succesorul.

Triangularea unui poligon - algoritmul “Ear clipping”



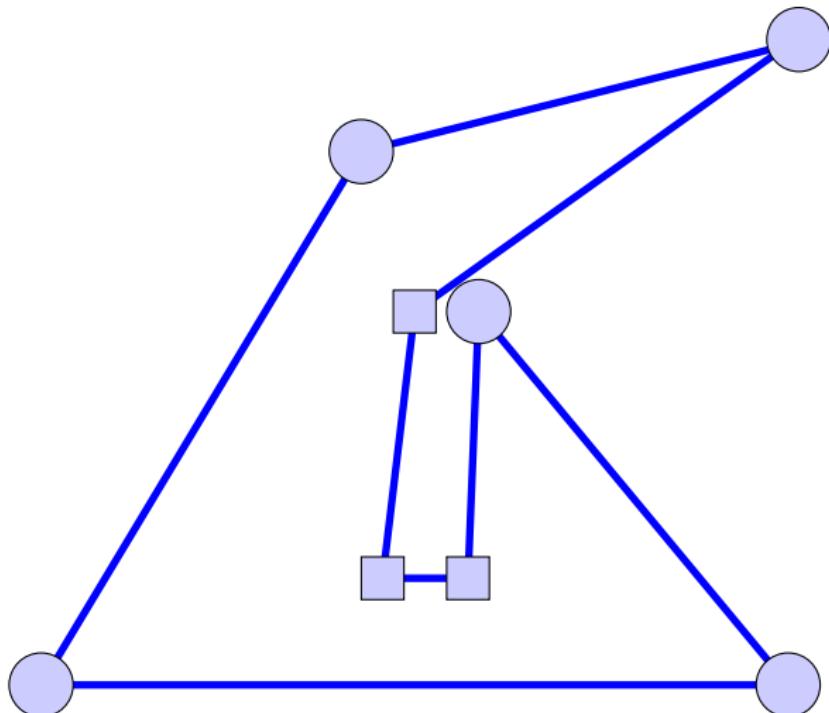
Procedura continuă....

Triangularea unui poligon - algoritmul “Ear clipping”



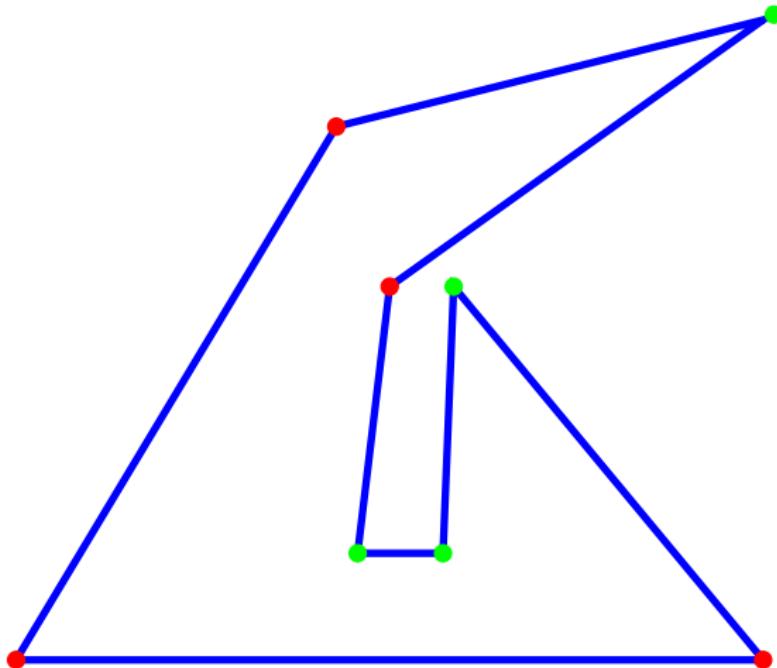
... se obține o triangulare a poligonului.

Clasificarea vârfurilor unui poligon - convexe/concave



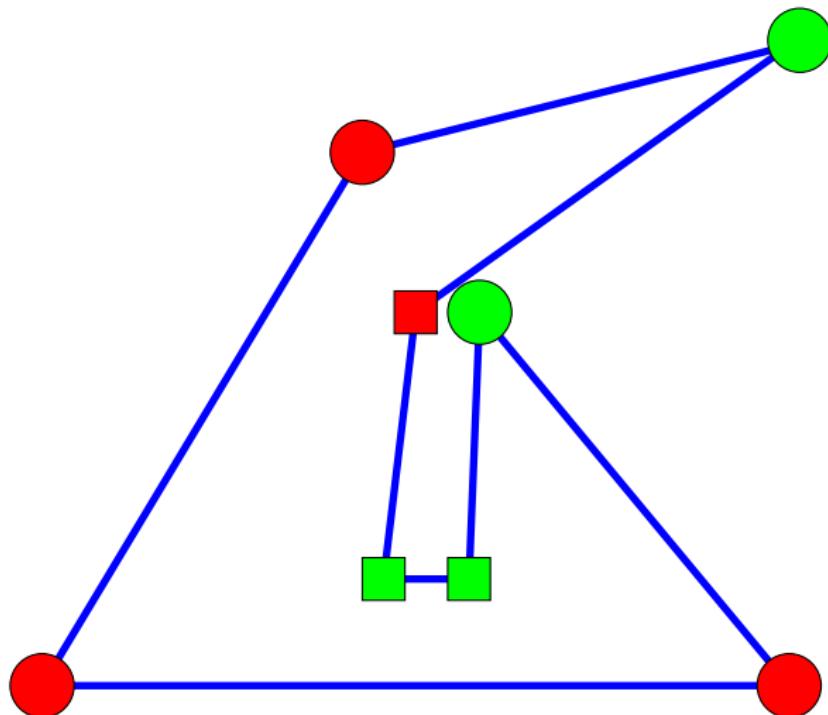
Vârfurile convexe (cerc) / concave (pătrat).

Clasificarea vârfurilor unui poligon - principale/neprincipale



Vârfurile principale (verde) / neprincipale (roșu).

Clasificarea vârfurilor unui poligon



Patru tipuri de vârfuri.

Metode de triangulare: ear cutting / clipping / trimming

- ▶ Concepte pentru un poligon $\mathcal{P} = (P_1, P_2, \dots, P_n)$:
 - **Vârf convex/concav ("reflex"):** se stabilește cu testul de orientare. Un vârf este convex \Leftrightarrow are același tip de viraj ca vârful "cel mai din stânga".
 - **Vârf principal:** P_i este principal dacă $[P_{i-1}P_{i+1}]$ este diagonală (echivalent: nu există un alt vârf în interiorul sau pe laturile $\Delta P_{i-1}P_iP_{i+1}$).
 - **Ear (vârf / componentă de tip E):** este un vârf principal convex [Meisters, 1975]. Dacă P_i este componentă de tip E, atunci segmentul $[P_{i-1}P_{i+1}]$ nu intersectează laturile poligonului și este situat în interiorul acestuia, adică este "diagonală veritabilă", iar $\Delta P_{i-1}P_iP_{i+1}$ poate fi "eliminat".
 - **Mouth (vârf / componentă de tip M):** este un vârf principal concav [Toussaint, 1991].
- ▶ **Criterii de clasificare a vârfurilor:** (i) vârf convex/concav; (ii) vârf principal/nu.
- ▶ **Teoremă.** (Two Ears Theorem [Meisters, 1975]) *Orice poligon cu cel puțin 4 vârfuri admite cel puțin două componente de tip E care nu se suprapun.*
- ▶ **Corolar.** *Orice poligon admite (cel puțin) o diagonală.*
- ▶ Găsirea unei componente de tip E: complexitate $O(n)$ [ElGindy, Everett, Toussaint, 1993]. Se bazează pe Two Ears Theorem!
- ▶ Algoritmul de triangulare bazat de metoda ear cutting: complexitate $O(n^2)$.
- ▶ Link despre triangulări. [Link pentru algoritmul Ear cutting](#)

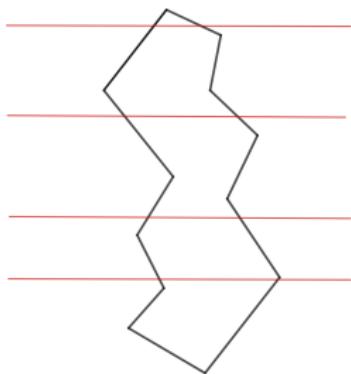
Metode de triangulare: descompunerea în poligoane monotone

- ▶ Algoritmi de triangulare eficienți: complexitate $O(n)$ pentru poligoane y -monotone [Garey et al., 1978] (algoritmul este descris pe slide-urile următoare).
- ▶ Descompunerea unui poligon oarecare în componente y -monotone poate fi realizată cu un algoritm de complexitate $O(n \log n)$ [Lee, Preparata, 1977]. În concluzie, avem următoarea
Teoremă. *Un poligon poate fi triangulat folosind un algoritm de complexitate $O(n \log n)$.*
- ▶ Există și alte clase de algoritmi mai rapizi; [Chazelle, 1990]: algoritm liniar.
- ▶ Găsirea unui algoritm liniar "simplu" [Problemă în The Open Problems Project](#)

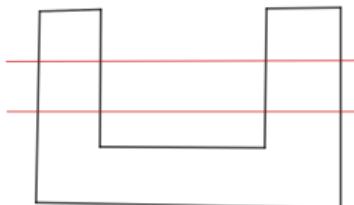
Metode de triangulare: descompunerea în poligoane monotone

- ▶ Concept: **poligon y-monoton**

Exemplul 1



Exemplul 2



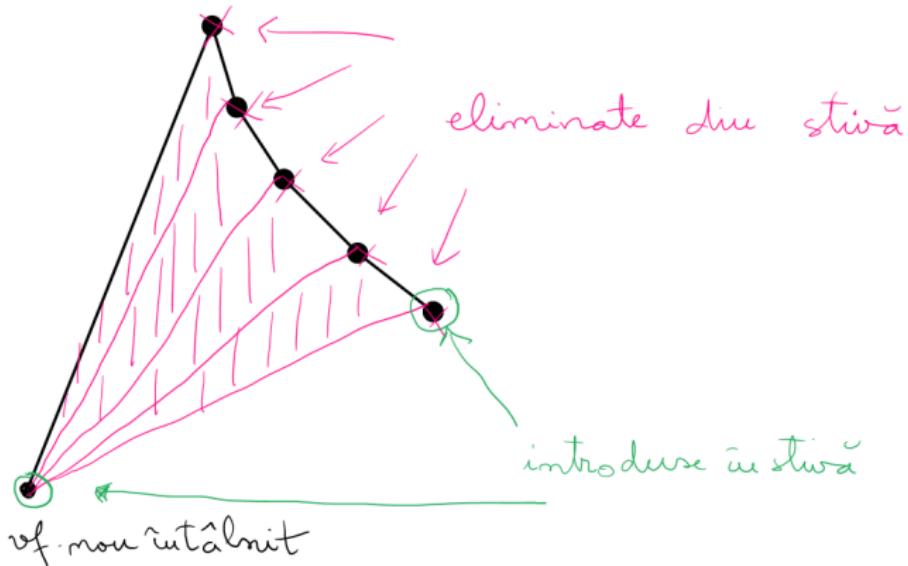
- ▶ Poligonul din Exemplul 1 **este y-monoton**: (i) poate fi parcurs de sus în jos în exact două moduri, fără întoarceri - există două lanțuri pe care se poate realiza parcurgerea, (ii) orice dreaptă orizontală intersectează reuniunea dintre poligon și interior după o mulțime conexă (\emptyset , punct sau segment). Poligonul din Exemplul 2 **nu este y-monoton**.

Metoda - paradigma dreptei de baleiere (*line sweep*)

- ▶ Se consideră o dreaptă de baleiere orizontală. Algoritmul reține o serie de informații legate de structura geometrică analizată.
- ▶ **Statut** al dreptei de baleiere: stivă a vârfurilor deja întâlnite, dar care "mai au nevoie de diagonale" / "mai pot să apară în triunghiuri".
(Clarificare. **Q:** Când este eliminat un vârf? **A:** Când a fost trasată o diagonală situată "mai jos de acesta").
- ▶ **Evenimente:** modificarea statutului. Sunt vârfurile poligonului, în prealabil ordonate după y ; pentru fiecare vârf știm dacă este pe lanțul din stânga sau pe cel din dreapta.
- ▶ **Invariant:** "pâlnie" (*funnel*) în care (i) vârful de sus este convex; (ii) pe o parte: o muchie; (iii) pe cealaltă parte: muchie / succesiune de vârfuri concave.

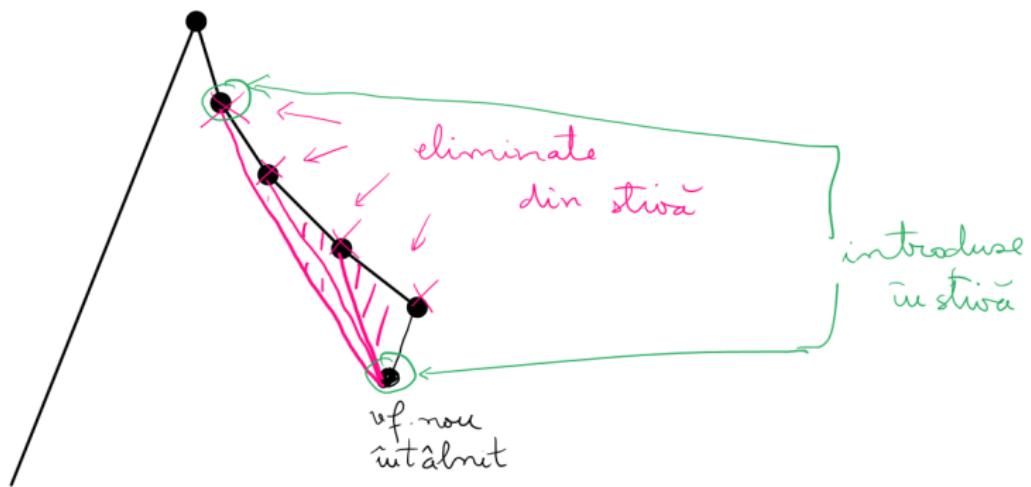
Evenimente - cazul 1

1. Vârful nou întâlnit este pe lanțul opus ultimului vârf din stivă.



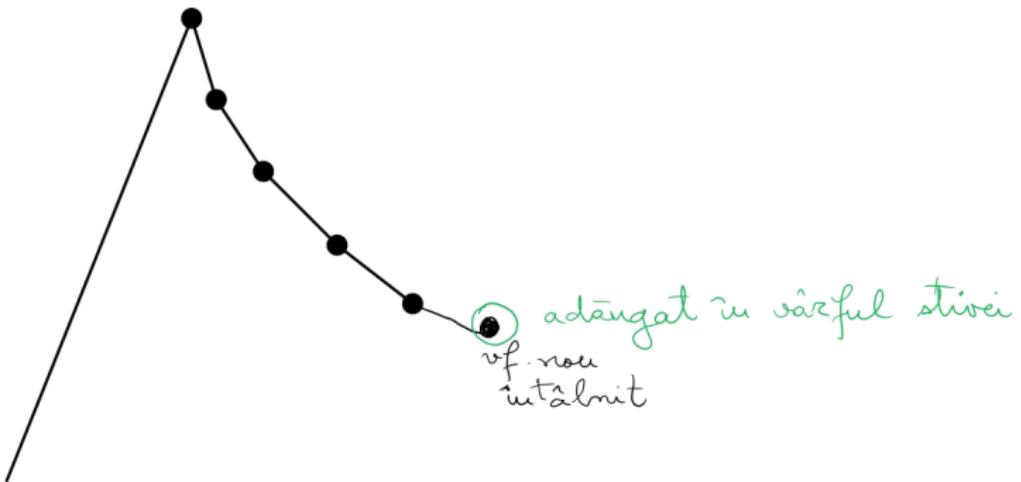
Evenimente - cazul 2a

2a. Vârful nou întâlnit este pe același lanț cu ultimul vârf din stivă.

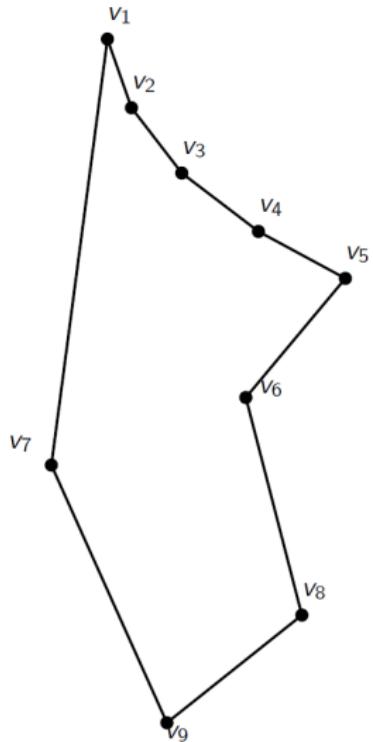


Evenimente - cazul 2b

2b. Vârful nou întâlnit este pe același lanț cu ultimul vârf din stivă.

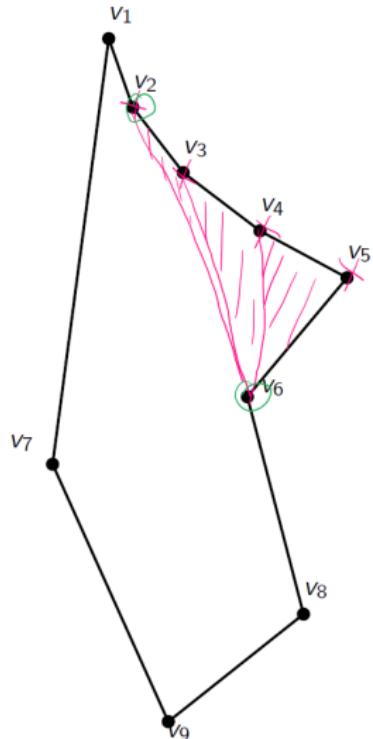


Exemplu



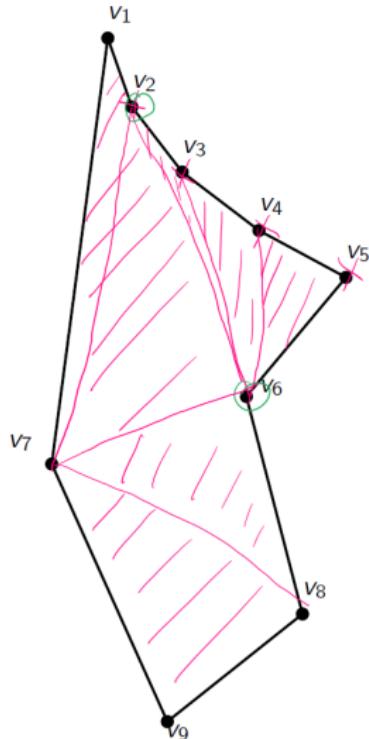
Eveniment	Stătut
	v_2 v_1
v_3 (caz 2b)	v_3 v_2 v_1
v_4 (caz 2b)	v_4 v_3 v_2 v_1

Exemplu



Eveniment	Stadut								
v_5 (ω_2 2b)	<table border="1"> <tr><td>v_5</td></tr> <tr><td>v_4</td></tr> <tr><td>v_3</td></tr> <tr><td>v_2</td></tr> <tr><td>v_1</td></tr> </table>	v_5	v_4	v_3	v_2	v_1			
v_5									
v_4									
v_3									
v_2									
v_1									
v_6 (ω_2 2a)	<table border="1"> <tr><td>v_5</td></tr> <tr><td>v_4</td></tr> <tr><td>v_3</td></tr> <tr><td>v_2</td></tr> <tr><td>v_1</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>v_6</td></tr> <tr><td>v_2</td></tr> <tr><td>v_1</td></tr> </table>	v_5	v_4	v_3	v_2	v_1	v_6	v_2	v_1
v_5									
v_4									
v_3									
v_2									
v_1									
v_6									
v_2									
v_1									

Exemplu



Eveniment	Stalut
v_7 (caz 1)	
v_8 (caz 1)	
v_9	Δ

La fiecare pas : diagonale în Δ în mod adecvat.

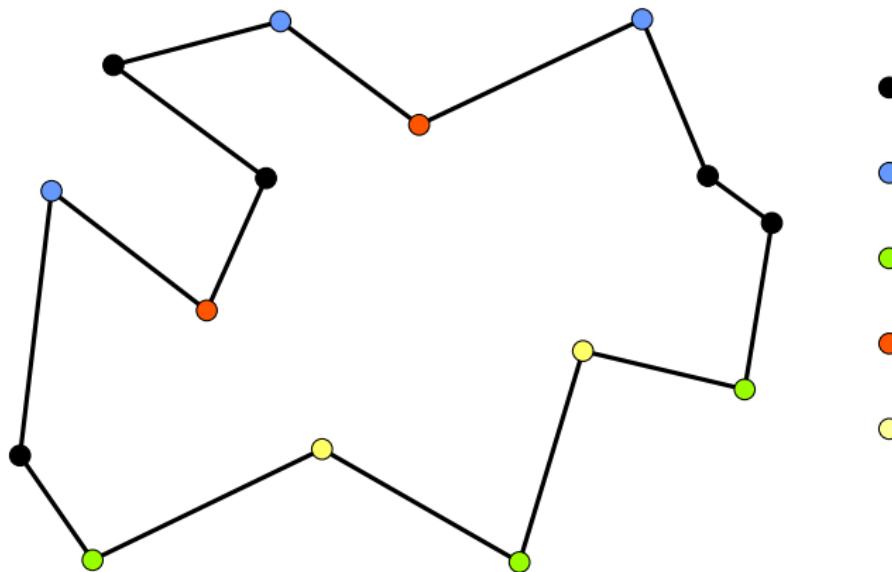
Triangularea poligoanelor monotone

Input: Un poligon y -monoton \mathcal{P} .

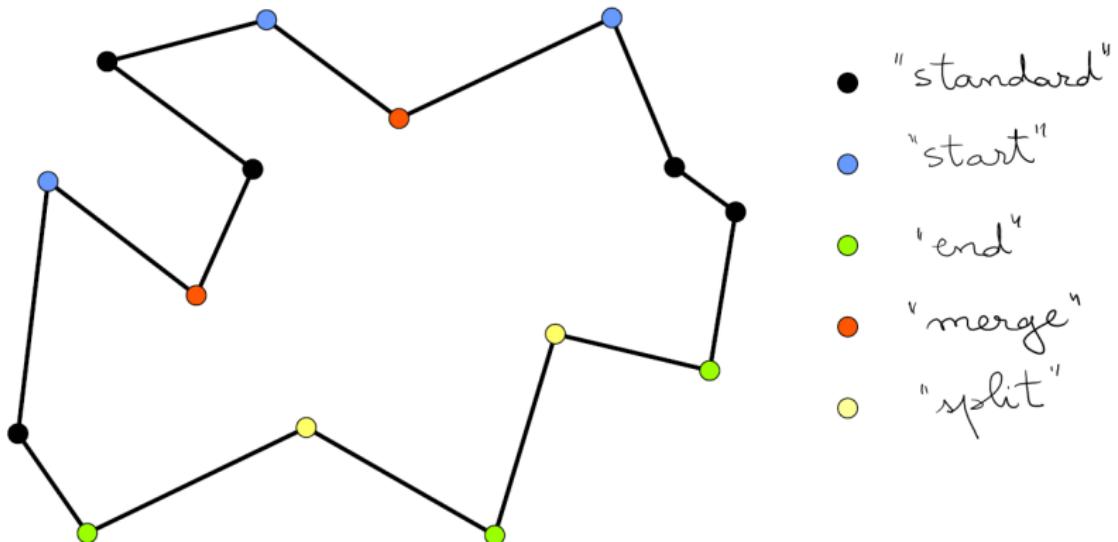
Output: O triangulare a lui \mathcal{P} .

1. Lanțul vârfurilor din partea stângă și al celor din partea dreaptă sunt unite într-un singur sir, ordonat descrescător, după y (dacă ordonata este egală, se folosește abscisa). Fie v_1, v_2, \dots, v_n sirul ordonat.
2. Inițializează o stivă vidă \mathcal{S} și inserează v_1, v_2 .
3. **for** $j = 3$ **to** $n - 1$
4. **do if** v_j și vârful din top al lui \mathcal{S} sunt în lanțuri diferite
5. **then** extrage toate vârfurile din \mathcal{S}
6. inserează diagonale de la v_j la vf. extrase, exceptând ultimul
7. inserează v_{j-1} și v_j în \mathcal{S}
8. **else** extrage un vârf din \mathcal{S}
9. extrage celelalte vârfuri din \mathcal{S} dacă diagonalele formate cu v_j sunt în interiorul lui \mathcal{P} ; inserează aceste diagonale; inserează înapoi ultimul vârf extras
10. inserează v_j în \mathcal{S}
11. adaugă diagonale de la v_n la vf. stivei (exceptând primul și ultimul)

Tipuri de vârfuri



Tipuri de vârfuri



Rezultate

- ▶ Folosind un algoritm bazat pe paradigma dreptei de baleiere și clasificarea vârfurilor indicată, un poligon cu n vârfuri poate fi descompus în poligoane y -monotone cu un algoritm având complexitatea-timp $O(n \log n)$.
- ▶ Conform algoritmului descris, un poligon y -monoton poate fi triangulat în timp liniar.
- ▶ **Teoremă (rezultatul principal)** *Un poligon cu n vârfuri poate fi triangulat cu complexitatea-timp $O(n \log n)$ și complexitatea-spațiu $O(n)$.*

Scurt rezumat

- ▶ Teorema galeriei de artă, exemple de aplicare (și la seminar).
- ▶ Clasificarea vârfurilor unui poligon (convexe/concave, principale/neprincipale).
- ▶ Algoritm de triangulare (*ear clipping*) cu complexitate-timp pătratică.
- ▶ Paradigma dreptei de baleiere.
- ▶ Algoritm de triangulare liniar pentru poligoane monotone. Aplicație la algoritm de triangulare cu complexitate timp $O(n \log n)$.

Algoritmi avansați

C10 - Triangularea mulțimilor de puncte

Mihai-Sorin Stupariu

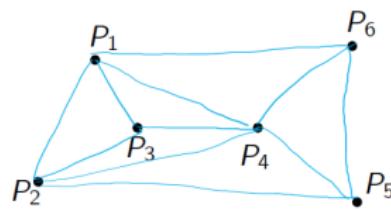
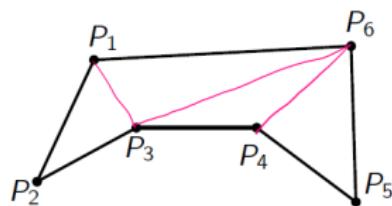
Sem. al II-lea, 2024 - 2025

Triangularea unei mulțimi arbitrară de puncte

Triangulări legale și triangulări unghiular optime

Problematizare

- ▶ Tema anterioară: triangularea unui poligon (listă ordonată de puncte (P_1, P_2, \dots, P_n)).
- ▶ Are sens să vorbim de triangulare pentru mulțimea $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$?
- ▶ **Exemplu:**



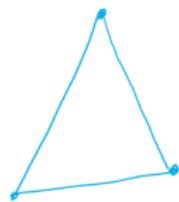
- ▶ În cele ce urmează vom considera doar mulțimi de puncte din planul \mathbb{R}^2 .

Problematizare

- ▶ **Definiție.** O **triangulare** a unei mulțimi \mathcal{P} este o subdivizare maximală a acoperirii convexe $\text{Conv}(\mathcal{P})$ a lui \mathcal{P} cu triunghiuri ale căror vârfuri sunt elemente ale lui \mathcal{P} (fără autointersecții!)
- ▶ Trebuie făcută distincție între triangulare a unui poligon (P_1, P_2, \dots, P_n) și triangulare a mulțimii subdiacente $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ (coincid dacă poligonul este convex!)
- ▶ **Comentariu:** Triangulările mulțimilor de puncte sunt esențiale în grafica pe calculator.

Exemple

(i) 3 puncte necoliniare

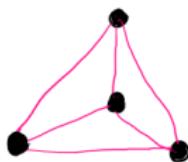


3 vârfuri
3 muchii
1 față

Exemple

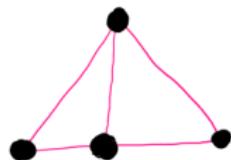
(ii) 4 puncte necoliniare, nesituate toate pe o aceeași dreaptă

(a)



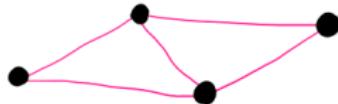
4 vârfuri
6 muchii
3 fete (3 Δ)

(b)



4 vârfuri
5 muchii
2 fete (2 Δ)

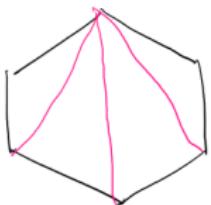
(c)



4 vârfuri
5 muchii
2 fete (2 Δ)

Elemente ale unei triangulări

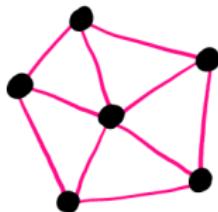
- ▶ Dată o mulțime de puncte \mathcal{P} și o triangulare \mathcal{T}_P a sa:
vârfuri, muchii, triunghiuri.
- ▶ Legătură cantitativă între aceste elemente?
- ▶ **Propoziție.** Fie \mathcal{P} o mulțime de n puncte din plan nesituate toate pe o aceeași dreaptă. Notăm cu k numărul de puncte de pe frontieră acoperirii convexe $\text{Conv}(\mathcal{P})$. Orice triangulare a lui \mathcal{P} are $(2n - k - 2)$ triunghiuri și $(3n - k - 3)$ muchii.
- ▶ **Exemplu:** Cazul unui (unor puncte care formează un) poligon convex: un poligon convex cu n vârfuri poate fi triangulat cu $(n - 2)$ triunghiuri, având $(2n - 3)$ muchii.



$$\underline{n = 6}$$

4 Δ
9 muchii

Demonstrație



Graf:

noduri: punctele initiale (n)

muchiile: laturile Δ ($n_m = ?$)

fetele: fețele Δ + fața exterioară
 $(n_t + 1)$

• Relația lui Euler: $n - n_m + (n_t + 1) = 2$

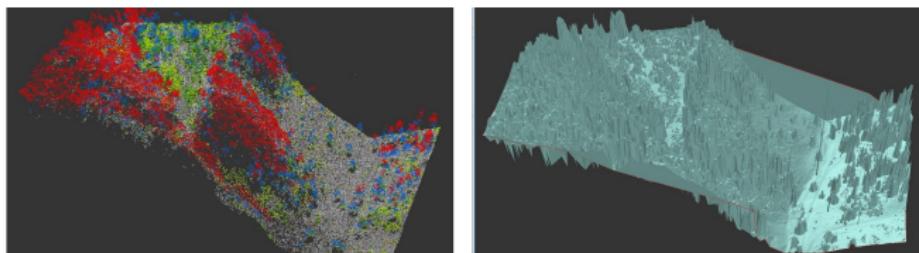
• Incidente dintre muchii și fețe

$$\underbrace{2 \cdot n_m}_{\text{"perspectiva muchiilor"}} = \underbrace{\frac{\text{ptr. } \Delta}{3 \cdot n_t} + \frac{\text{ptr. fața exterioară}}{k}}_{\text{"perspectiva fețelor"}}$$

$$\begin{cases} \Rightarrow \dots \\ \Rightarrow \dots \\ n_m = \dots \\ n_t = \dots \end{cases}$$

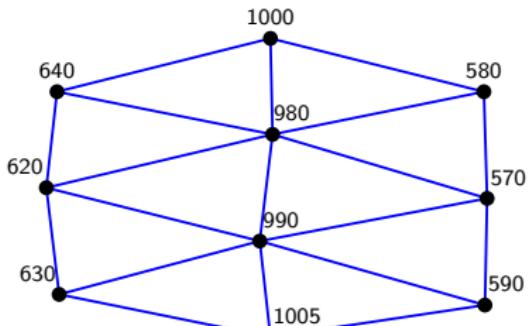
Problematizare

- **Problemă.** Se fac măsurători ale altitudinii pentru un teren. Se dorește **reprezentarea tridimensională** (cât mai sugestivă) . Alternativ: se dorește **generarea unui teren** pentru o aplicație.

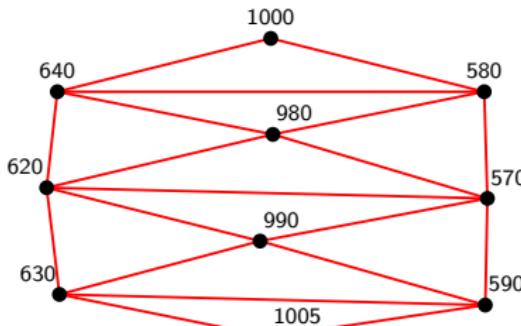


Problematizare - continuare

- ▶ **Problemă (reformulată).** Cum "comparăm triangulările" unei mulțimi de puncte fixate?
- ▶ **Exemplu.** Măsurători ale altitudinii.



Triangulare 1



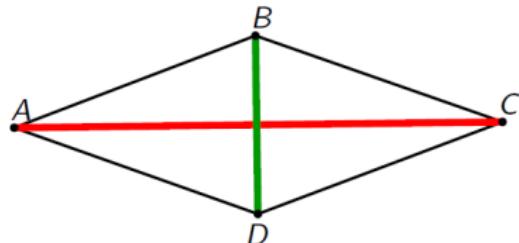
Triangulare 2

- ▶ **Întrebări naturale:** (i) Există o triangulare "convenabilă" a unei mulțimi de puncte? (ii) Cum poate fi determinată eficient o astfel de triangulare?

Terminologie, triangulări legale

- ▶ Fixată: o mulțime de puncte \mathcal{P} . **În cele ce urmează vom presupune că \mathcal{P} este o mulțime de puncte din planul \mathbb{R}^2 .**
- ▶ Fie \mathcal{T} o triangulare a lui \mathcal{P} cu m triunghiuri. Fie $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{3m}$ unghiiurile lui \mathcal{T} , ordonate crescător. **Vectorul unghiurilor lui \mathcal{T} este $A(\mathcal{T}) = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{3m})$.**
- ▶ **Relație de ordine pe mulțimea triangulărilor lui \mathcal{P} :** ordinea lexicografică pentru vectorii unghiurilor. Fie \mathcal{T} și \mathcal{T}' două triangulări ale lui \mathcal{P} . Atunci $A(\mathcal{T}) > A(\mathcal{T}')$ dacă $\exists i$ astfel ca $\alpha_j = \alpha'_j$, $\forall 1 \leq j < i$ și $\alpha_i > \alpha'_i$.
- ▶ **Triangulare unghiular optimă:** \mathcal{T} astfel ca $A(\mathcal{T}) \geq A(\mathcal{T}')$, pentru orice triangulare \mathcal{T}' .

Exemplu - cazul unui patrulater convex



diagonala AC
 $\Rightarrow \triangle BAC \neq \triangle DAC$

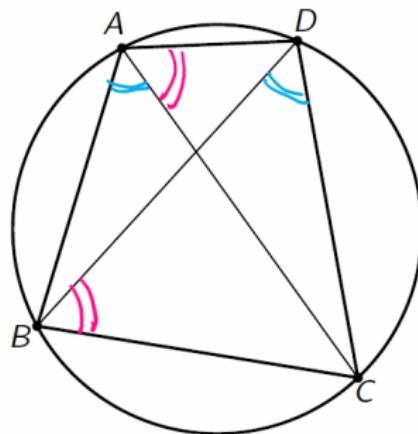
diagonala BD
 $\Rightarrow \triangle ABD \neq \triangle CBD$

diagonala $AC \Rightarrow$ vectorul unghiurilor (α)
 $BD \Rightarrow _ _ _ (\beta)$

$$\alpha < \beta$$

“Cel mai mic unghi care apare în triangularea dată de AC este mai mic decât cel mai mic unghi care apare în triangularea dată de BD .”

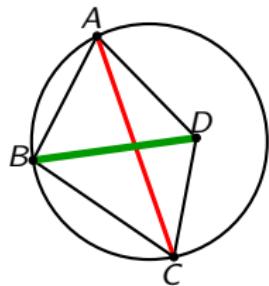
Exemplu - cazul unui patrulater inscriptibil



În acest caz triunghiurile formate de diagonale au “cele mai mici unghiuri” congruente, deci nu putem distinge între cele două diagonale.

Muchii ilegale

- ▶ **Conceptul de muchie ilegală.** Fie $A, B, C, D \in \mathbb{R}^2$ fixate astfel ca $ABCD$ să fie un patrulater convex; fie $\mathcal{T}_{AC}, \mathcal{T}_{BD}$ triangulările date de diagonalele AC , respectiv BD . Muchia AC este **ilegală** dacă
$$\min A(\mathcal{T}_{AC}) < \min A(\mathcal{T}_{BD}).$$
- ▶ **Criteriu geometric** pentru a testa dacă o muchie este legală: muchia AC , adiacentă cu triunghiurile ΔACB și ΔACD este ilegală dacă și numai dacă punctul D este situat în interiorul cercului circumscris ΔABC .



Muchii ilegale

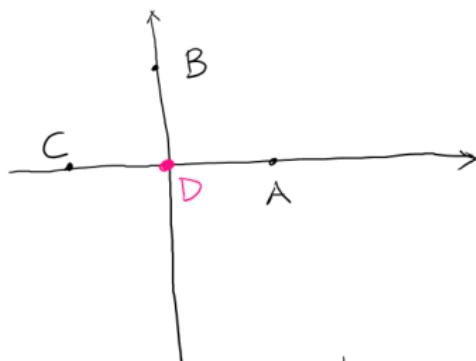
- ▶ **Criteriu numeric / analitic** pentru a testa dacă o muchie este ilegală.

- ▶ Pentru puncte $A = (x_A, y_A)$, $B = (x_B, y_B)$, $C = (x_C, y_C)$, $D = (x_D, y_D)$:

$$\Theta(A, B, C, D) = \begin{vmatrix} x_A & y_A & x_A^2 + y_A^2 & 1 \\ x_B & y_B & x_B^2 + y_B^2 & 1 \\ x_C & y_C & x_C^2 + y_C^2 & 1 \\ x_D & y_D & x_D^2 + y_D^2 & 1 \end{vmatrix}$$

- ▶ (i) Punctele A, B, C, D sunt conciclice $\Leftrightarrow \Theta(A, B, C, D) = 0$.
- (ii) Fie A, B, C astfel ca ABC să fie un viraj la stânga. Un punct D este situat în interiorul cercului circumscris $\Delta ABC \Leftrightarrow \Theta(A, B, C, D) > 0$.

Exemplu



$$A = (1, 0)$$

$$B = (0, 1)$$

$$C = (-1, 0)$$

- ABC este viraj la stânga

$$D = (0, 0)$$

$$\bullet \text{ (H)} (A, B, C, D) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} = (-1)^{4+4} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix} =$$

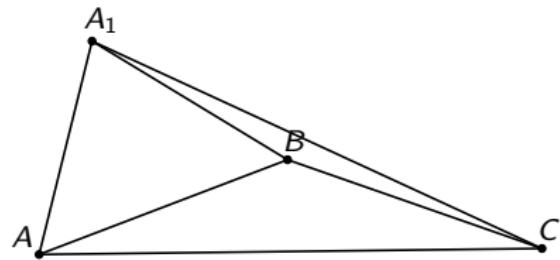
$$= \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix} \geq 0$$

D este în interiorul cercului circumscris $\triangle ABC$.

Exercițiu: calculați pt. $E = (0, -1)$ și $F = (0, -2)$

Muchii ilegale, triangulări legale

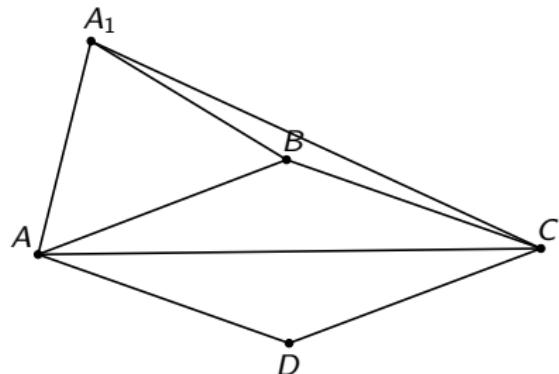
- **Concluzie:** Dacă muchia AC este ilegală, printr-un *flip* (înlocuirea ei cu BD), cel mai mic unghi poate fi mărit (local).



D

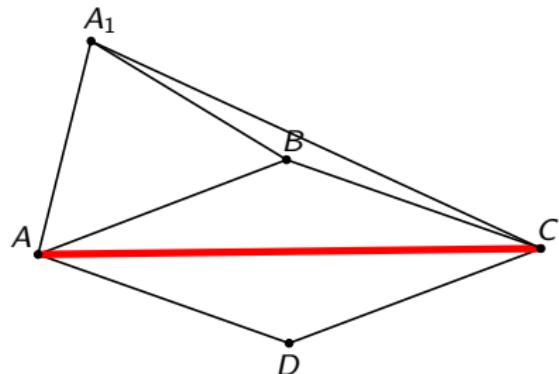
Muchii ilegale, triangulări legale

- **Concluzie:** Dacă muchia AC este ilegală, printr-un *flip* (înlocuirea ei cu BD), cel mai mic unghi poate fi mărit (local).



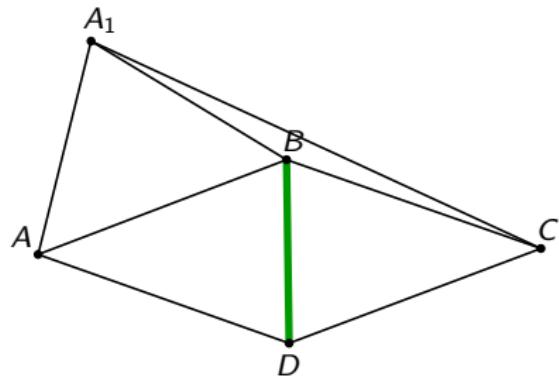
Muchii ilegale, triangulări legale

- **Concluzie:** Dacă muchia AC este ilegală, printr-un *flip* (înlocuirea ei cu BD), cel mai mic unghi poate fi mărit (local).



Muchii ilegale, triangulări legale

- **Concluzie:** Dacă muchia AC este ilegală, printr-un *flip* (înlocuirea ei cu BD), cel mai mic unghi poate fi mărit (local).



Muchii ilegale, triangulări legale

- ▶ **Concluzie:** Dacă muchia AC este ilegală, printr-un *flip* (înlocuirea ei cu BD), cel mai mic unghi poate fi mărit (local). Prințr-un flip, vectorul unghiurilor crește.
- ▶ **Concluzie (reformulare):** Fie \mathcal{T} o triangulare cu o muchie ilegală e , fie \mathcal{T}' triangularea obținută din \mathcal{T} prin *flip*-ul muchiei e . Atunci $A(\mathcal{T}') > A(\mathcal{T})$.
- ▶ **Triangulare legală:** nu are muchii ilegale. **Fapt:** O triangulare legală a unei mulțimi cu n puncte poate fi determinată printr-un algoritm incremental randomizat, cu complexitate-timp medie $O(n \log n)$.

Triangulări unghiular optime vs. triangulări legale

► **Propoziție.** Fie \mathcal{P} o mulțime de puncte din plan.

- (i) Orice triangulare unghiular optimă este legală.
- (ii) Dacă \mathcal{P} este în poziție generală (oricare patru puncte nu sunt conciclice), atunci există o unică triangulare legală, iar aceasta este unghiular optimă.

► **Teoremă.** Fie \mathcal{P} o mulțime de n puncte din plan, în poziție generală. Triangularea unghiular optimă poate fi construită, folosind un algoritm incremental randomizat, în timp mediu $O(n \log n)$, folosind $O(n)$ memorie medie.

Scurt rezumat

- ▶ Triangulare a unei multimi de puncte. Rezultat referitor la numărul de triunghiuri și muchii ale unei triangulări (și la seminar).
- ▶ Compararea triangulărilor - criteriu folosind unghiurile. Triangulări unghiular optime.
- ▶ Conceptul de muchie ilegală. Criteriu numeric referitor la configurația a patru puncte.
- ▶ Triangulări legale.
- ▶ Legătura dintre triangulările unghiular optime și triangulările legale.

Algoritmi avansați

C11 - Diagrame Voronoi

Mihai-Sorin Stupariu

Sem. al II-lea, 2024 - 2025

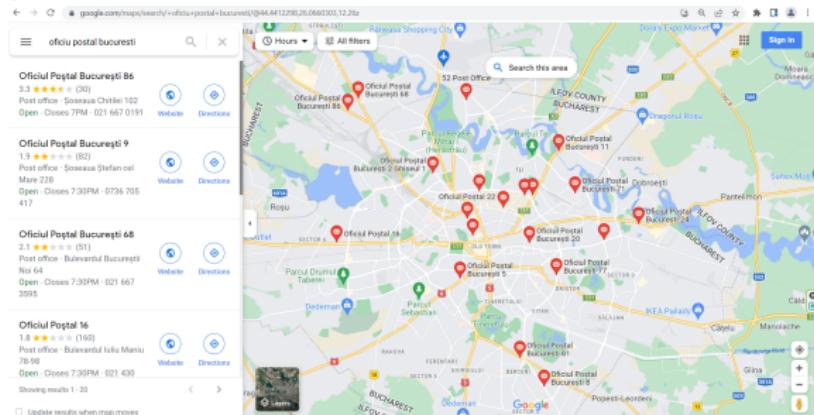
Definiție, proprietăți elementare

Diagrame Voronoi și triangulări Delaunay

Un algoritm eficient

Motivație

- ▶ *Problema oficiilor poștale:* Se consideră o mulțime de puncte (oficiile poștale) din plan. Ce zone vor deservi aceste oficii?



Sursa: [Google Maps](#)

- ▶ Ideea de a delimita “zone de influență” a apărut cu multă vreme în urmă (de exemplu în lucrările lui Descartes, dar și în legătură cu alte probleme; este utilizată în mod curent în varii domenii. În plus, astfel de “împărțiri” apar **în natură**. Conceptul aferent este cel de **diagramă Voronoi** - există o multitudine de aplicații.

Aplicații - rețele de transport

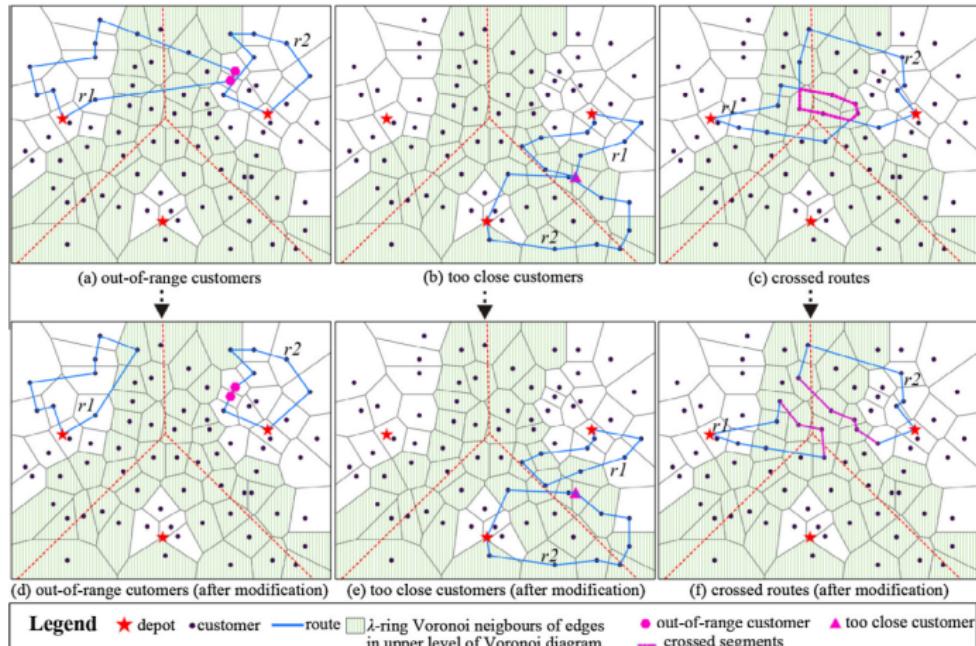


Fig. 3. Inappropriate routes between depots and their modifications.

Sursa: [Tu et al., 2014]

Aplicații - rețele de transport

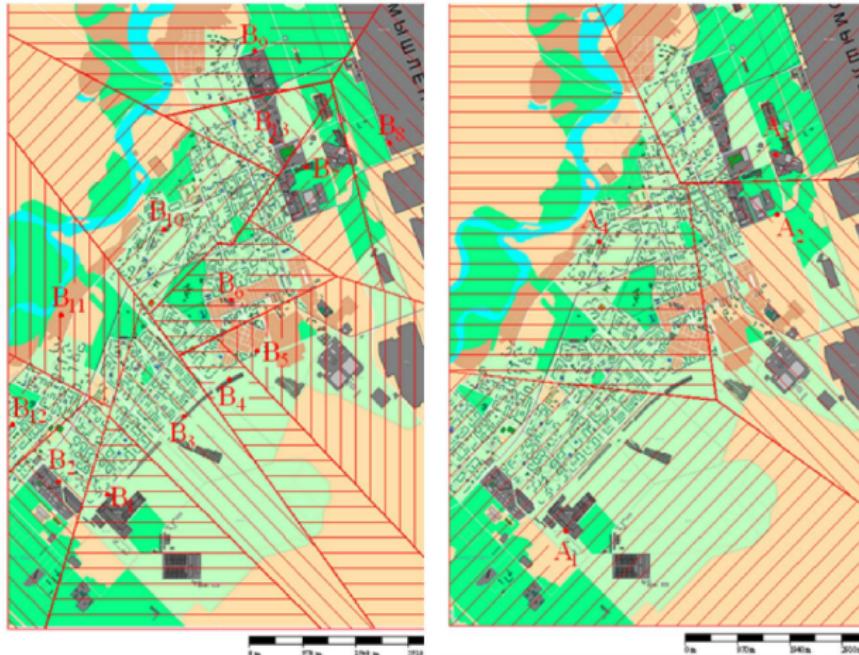


Fig. 4. Voronoi diagram to optimize: (a) the zones serviced by transport terminals of large city districts;(b) freight delivery zones from the logistic centers of a large city.

Sursa: [Lebedeva et al., 2018]

Aplicații - medicină

ANTIGA *et al.*: COMPUTATIONAL GEOMETRY FOR PATIENT-SPECIFIC RECONSTRUCTION AND MESHING OF BLOOD VESSELS

681

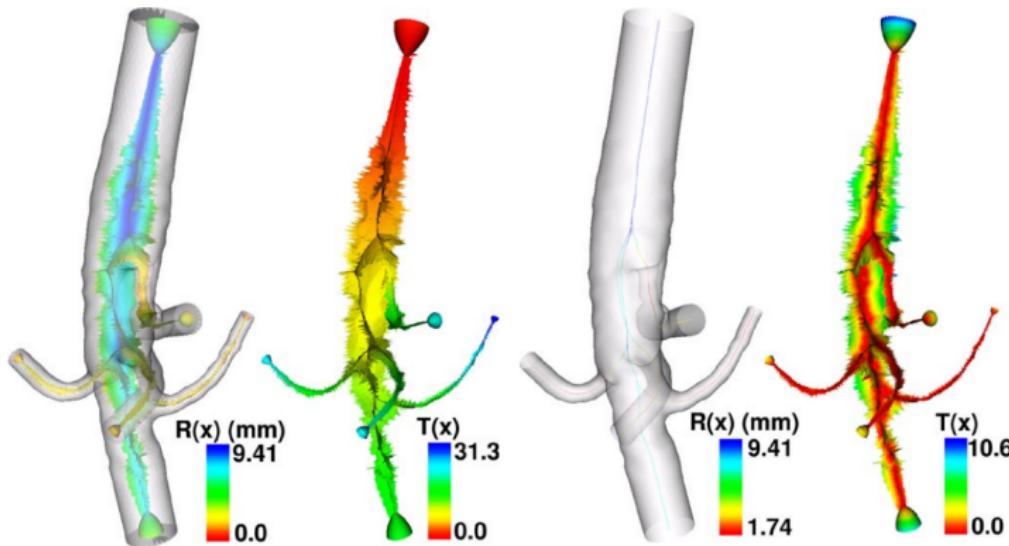


Fig. 8. Voronoi diagram colored according to maximal inscribed sphere radius values $R(x)$ (left), and solution $T(x)$ of Eikonal equation from aorta inlet (right) for the abdominal aorta model (Surface: 8096 points, 16188 triangles. Voronoi diagram: 26463 points, 18370 polygons. Voronoi diagram computation time: 10 s. Solution of Eikonal equation time: 8 s).

Fig. 9. Calculated central paths (left) and solution of Eikonal equation from central path points (right) for subsequent surface characterization (total five central paths backtracing time: 1 s. Solution of Eikonal equation time: 8 s). $R(x)$ is maximal inscribed ball radius values defined on central paths, and $T(x)$ is maximal traveltime (since in this case $F(x) = 1$ everywhere, $T(x)$ also represents geodesic distance).

Sursa: [Antiga et al., 2003]

Aplicații - medicină

C. Wang, H.R. Roth, T. Kitasaka et al. / Computerized Medical Imaging and Graphics 77 (2019) 101642

3

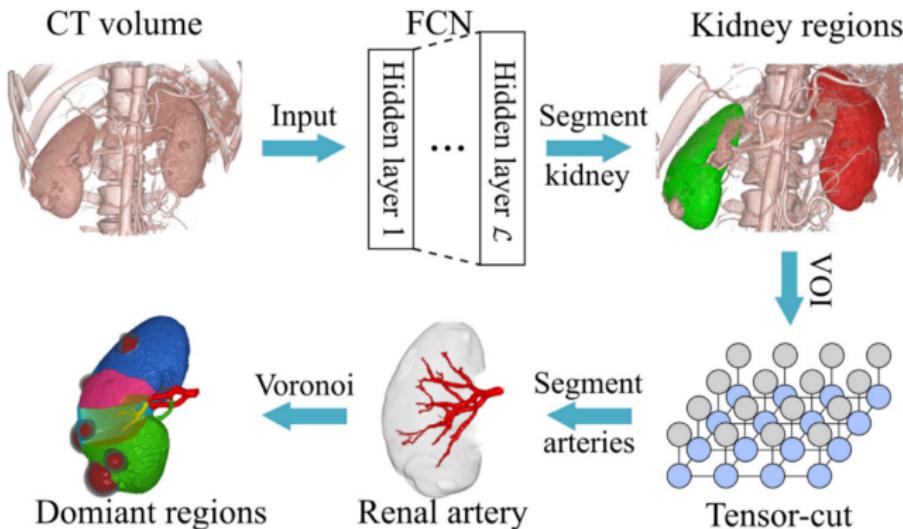
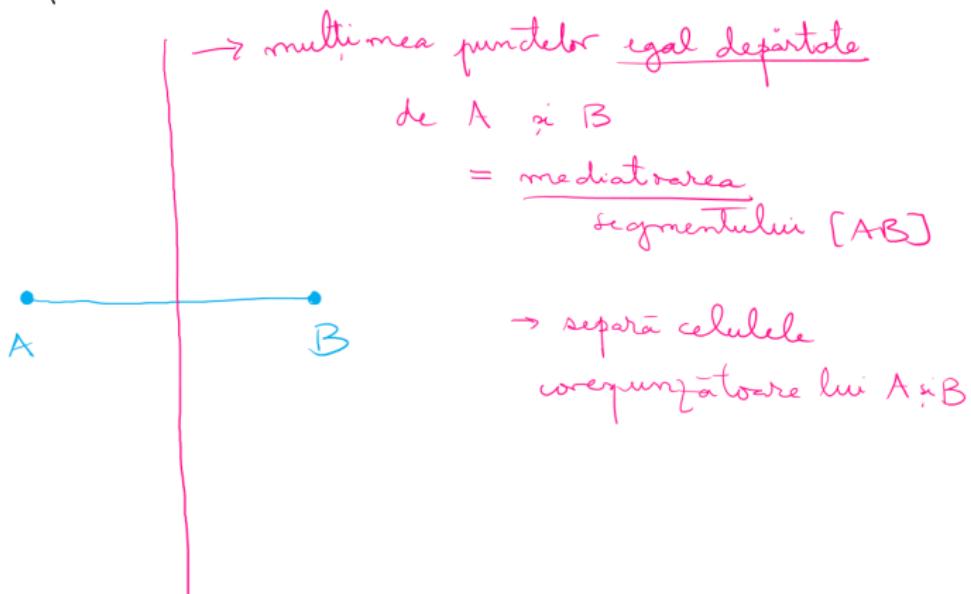


Fig. 1. Workflow: Our precise estimation approach can be divided into three parts: kidney segmentation, renal artery segmentation and estimation of vascular dominant regions.

Sursa: [Wang et al., 2019]

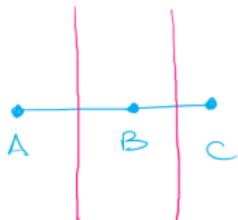
Exemple - diagrame Voronoi în context 2D

1)

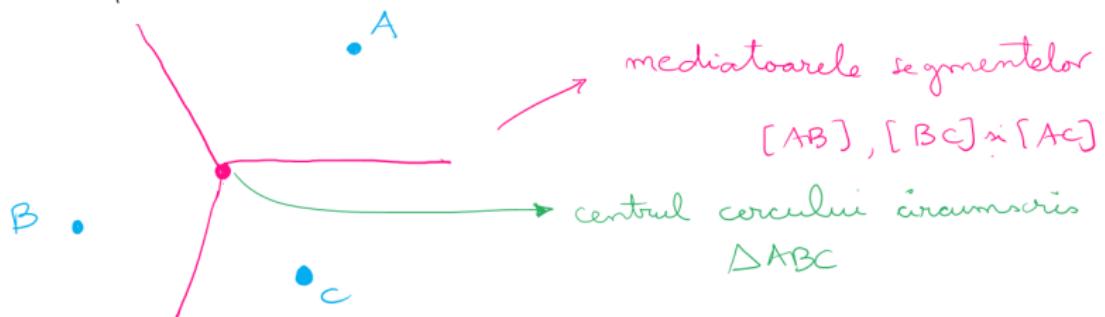
2 puncte distincte

Exemple - diagrame Voronoi în context 2D

2) 3 puncte distincte, coliniare

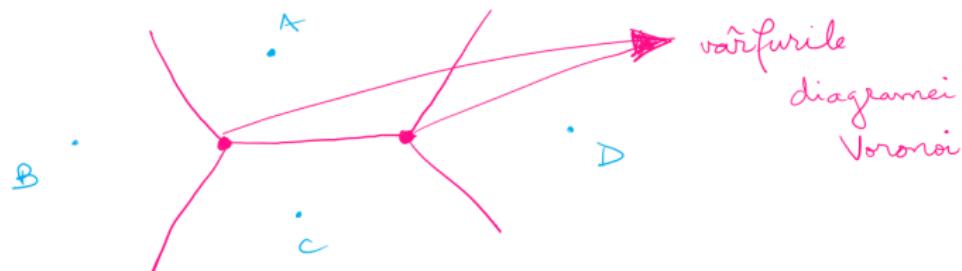


3) 3 puncte necoliniare

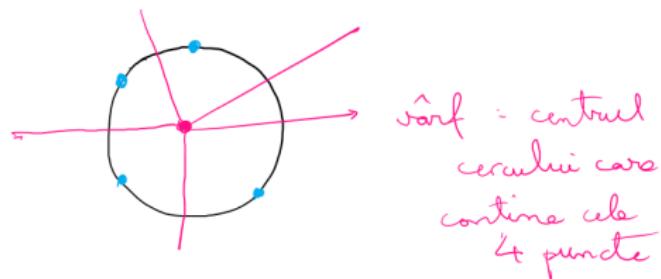


Exemple - diagrame Voronoi în context 2D

4) 4 puncte neclini ore, necociclice



4') 4 puncte concidice



Formalizare

- ▶ Fie $\mathcal{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ o mulțime de puncte din planul \mathbb{R}^2 , numite **situri**.
- ▶ **Diagrama Voronoi** a lui \mathcal{P} (notată $\text{Vor}(\mathcal{P})$) este o divizare a planului \mathbb{R}^2 în n celule $\mathcal{V}(P_1), \dots, \mathcal{V}(P_n)$ cu proprietatea că

$$P \in \mathcal{V}(P_i) \Leftrightarrow d(P, P_i) \leq d(P, P_j), \quad \forall j = 1, \dots, n.$$

- ▶ Două celule adiacente au în comun o *muchie* sau un *vârf* (punct de intersecție a muchiilor).
- ▶ **Atenție!** Vârfurile lui $\text{Vor}(\mathcal{P})$ sunt diferite de punctele din \mathcal{P} .
- ▶ Uneori, prin abuz de limbaj, este precizată doar împărțirea în muchii / vârfuri.
- ▶ Diagrame Voronoi pot fi construite pentru **diverse funcții distanță** (e.g. **distanța Manhattan**); forma celulelor depinde de **forma "cercului"** în raport cu funcția distanță respectivă. De asemenea, există și **diagrame Voronoi cu ponderi**.

Structura unei diagrame Voronoi

- ▶ Fie $\mathcal{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ o mulțime de situri (puncte) din planul \mathbb{R}^2 .
- ▶ Celula asociată unui punct este o intersecție de semiplane:

$$\mathcal{V}(P_i) = \bigcap_{j \neq i} h(P_i, P_j),$$

unde $h(P_i, P_j)$ este semiplanul determinat de mediatoarea segmentului $[P_i P_j]$ care conține punctul P_i . În particular: fiecare celulă este o mulțime convexă.

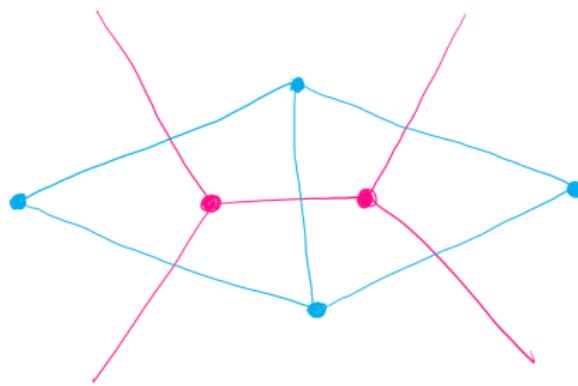
Aplicabilitate: algoritm (lent, complexitate-timp $O(n^2 \log n)$) de determinare a diagramei Voronoi.

- ▶ Dacă toate punctele sunt coliniare, atunci diagrama Voronoi asociată $\text{Vor}(\mathcal{P})$ conține $n - 1$ drepte paralele între ele (în particular, pentru $n \geq 3$, ea nu este conexă). În caz contrar, diagrama este conexă, iar muchiile sale sunt fie *segmente*, fie *semidrepte* (cui corespund acestea?). Există o propoziție care caracterizează mediatoarele segmentelor $[P_i P_j]$ care definesc muchii ale diagramei Voronoi.
- ▶ **Propoziție.** Fie o mulțime cu n situri. Atunci, pentru diagrama Voronoi asociată au loc inegalitățile

$$n_v \leq 2n - 5, \quad n_m \leq 3n - 6,$$

unde n_v este numărul de vârfuri ale diagramei și n_m este numărul de muchii ale acesteia.

Legătura cu triangulările legale / unghiular optime

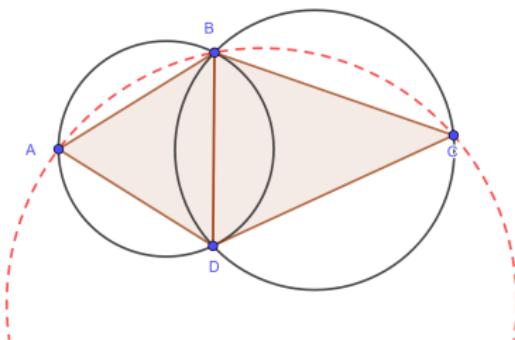


► Construcție:

- Mulțime de puncte \mathcal{P} în planul $\mathbb{R}^2 \implies$
- Diagrama Voronoi $\text{Vor}(\mathcal{P}) \implies$
- Graful dual $\mathcal{G}(\mathcal{P})$. **Noduri:** fețele diagramei Voronoi (siturile). **Arce:** dacă celulele (fețele diagramei Voronoi corespunzătoare) au o muchie comună \implies
- Triangulare $\mathcal{T}_{\mathcal{P}}$ (numită **triangulare Delaunay**)

Legătura cu triangulările legale / unghiular optime

- ▶ **Propoziție.** Fie \mathcal{T} o triangulare a lui \mathcal{P} . Atunci \mathcal{T} este o triangulare Delaunay dacă și numai dacă pentru orice triunghi din \mathcal{T} cercul circumscris nu conține în interiorul său niciun punct al lui \mathcal{P} .

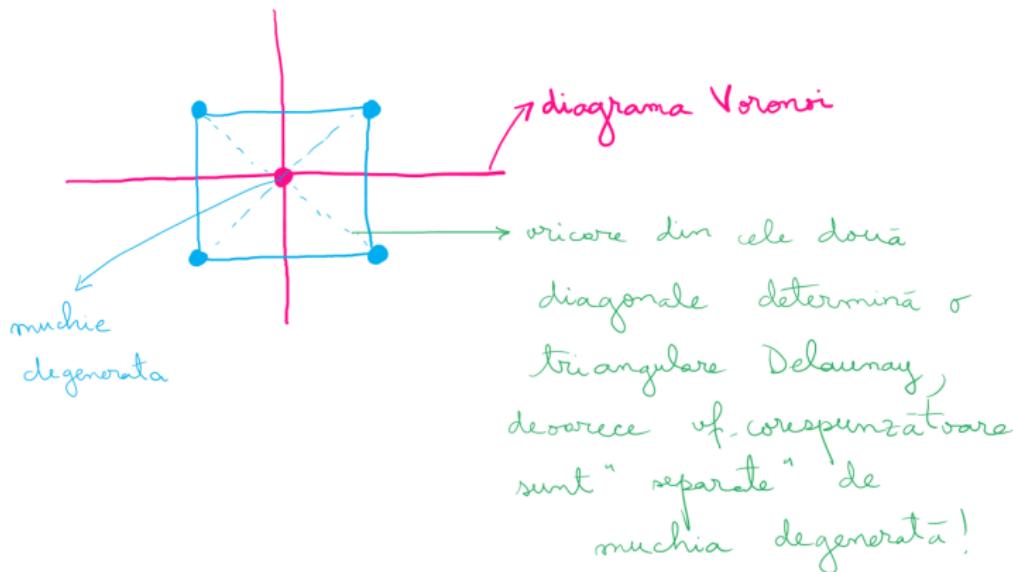


Pentru punctele A, B, C, D din figură, triangularea construită este o triangulare Delaunay. În schimb, triunghiul ΔABC nu poate participa la realizarea unei triangulări Delaunay, deoarece D este în interiorul cercului circumscris acestuia.

- ▶ **Teoremă.** O triangulare este legală dacă și numai dacă este o triangulare Delaunay.
- ▶ **Teoremă.** Orice triangulare unghiular optimă este o triangulare Delaunay. Pentru mulțimile în poziție generală (nu există patru puncte conciclice), orice triangulare Delaunay maximizează cel mai mic unghi, comparativ cu toate triangulările lui \mathcal{P} .

Legătura cu triangulările legale / unghiular optime - cazul unui pătrat

Întrebare: Cum “funcționează” această construcție când punctele din \mathcal{P} sunt (de exemplu) vârfurile unui pătrat?

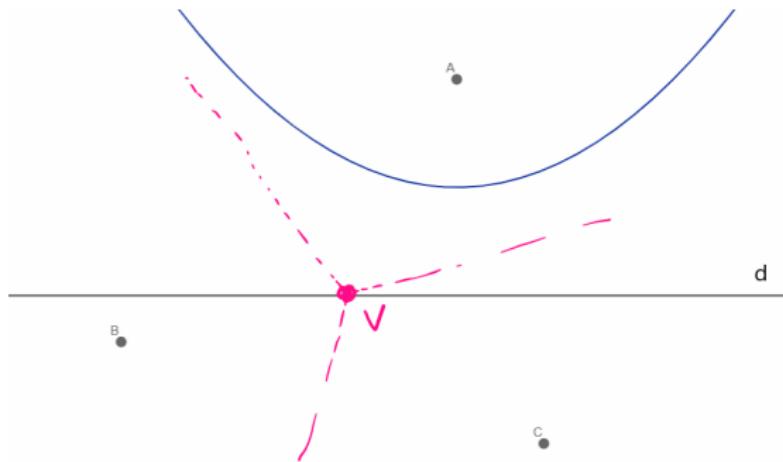


Algoritmul lui Fortune [1987]

- ▶ Metodă clasice (și eficiente) de determinare a diagramei Voronoi pentru o mulțime de puncte din planul \mathbb{R}^2 . Complexitate: $O(n \log n)$.
Detalii:
<http://www.ams.org/samplings/feature-column/fcarc-voronoi>.
Suport vizual disponibil.
- ▶ **Principiu (paradigmă):** sweep line / dreaptă de baleiere.

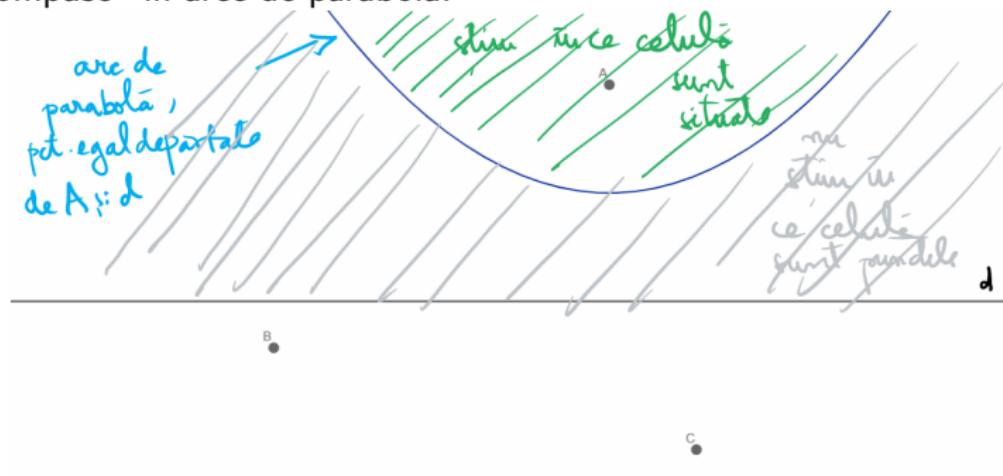
Adaptarea paradigmăi dreptei de baleiere - problematizare

Inconvenient: la întâlnirea unui vîrf al diagramei, dreapta de baleiere nu a întâlnit încă toate siturile (punkte din \mathcal{P}) care determină acest vîrf! În figură, la trecerea prin vîrful V al diagramei Voronoi, dreapta de baleiere d nu a întâlnit încă toate siturile care determină V . Altfel spus, V ar trebui detectat înainte de a trece prin B și C .



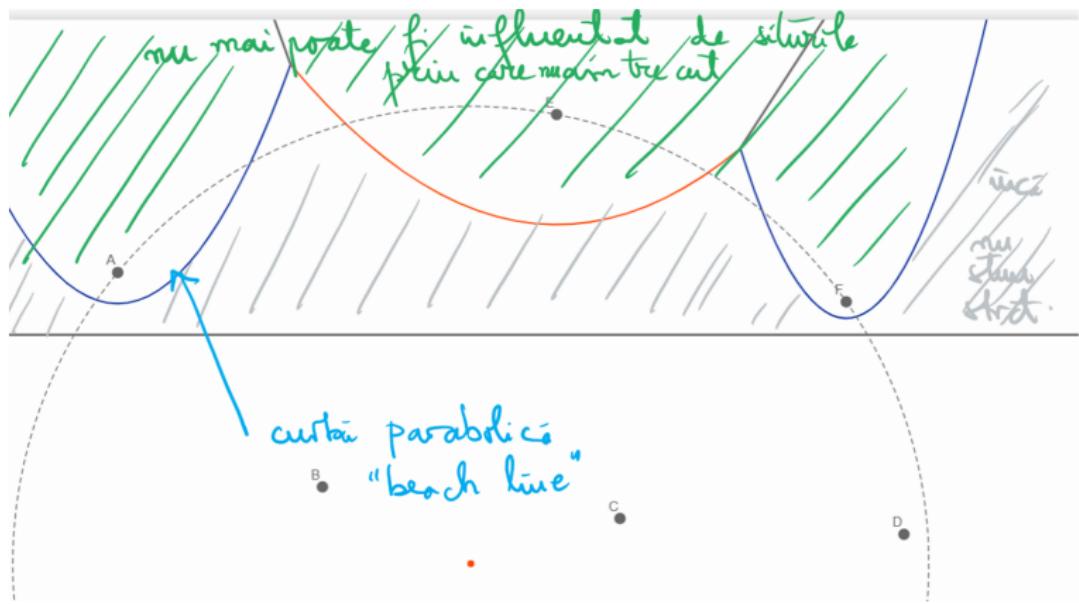
Adaptarea paradigmăi dreptei de baleiere

Adaptare: nu reținem informația legată de intersecția dintre dreapta de baleiere și diagramă, ci doar informația legată de partea diagramei care nu mai poate fi influențată de punctele situate de dincolo de dreapta de baleiere. Acest lucru se realizează asociind fiecărui sit câte o parabolă - mulțimea punctelor egal depărtate de sit și de dreapta de baleiere. Pe parcurs (i) aceste parbole își schimbă formă, (ii) pot să dispară / să fie "descompuse" în arce de parabolă.



Adaptarea paradigmăi dreptei de baleiere - curba parabolică

Din punct de vedere practic, apare o reuniune de arce de parabolă (**curbă parabolică**), ceea ce este situat deasupra acestei curbe nu mai poate fi influențat de evenimentele nedetectate.



Despre curba parabolică (I)

► Curba parabolică (*beach line*):

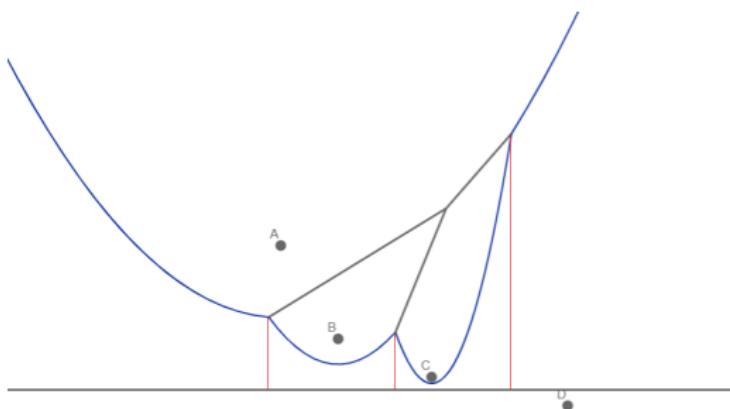
- Este o reuniune de arce de parabolă.
- Un punct de pe curba parabolică este egal depărtat de situl care determină arcul de parabolă și dreapta de baleiere. Presupunem că dreapta de baleiere d are ecuația $y = 0$, iar situl P_i , situat deasupra lui d (adică $y_i > 0$) are coordonatele (x_i, y_i) . Locul geometric al punctelor egal depărtate de d și P_i are ecuația

$$y = \frac{1}{2y_i}x^2 - \frac{x_i}{y_i}x + \frac{x_i^2 + y_i^2}{2y_i}.$$

- Punctele de racord ale arcelor de parabolă aparțin muchiilor diagramei Voronoi.
- Curba parabolică este x -monotonă, adică orice dreaptă verticală o intersectează *exact* într-un punct (la ce folosește această proprietate?).

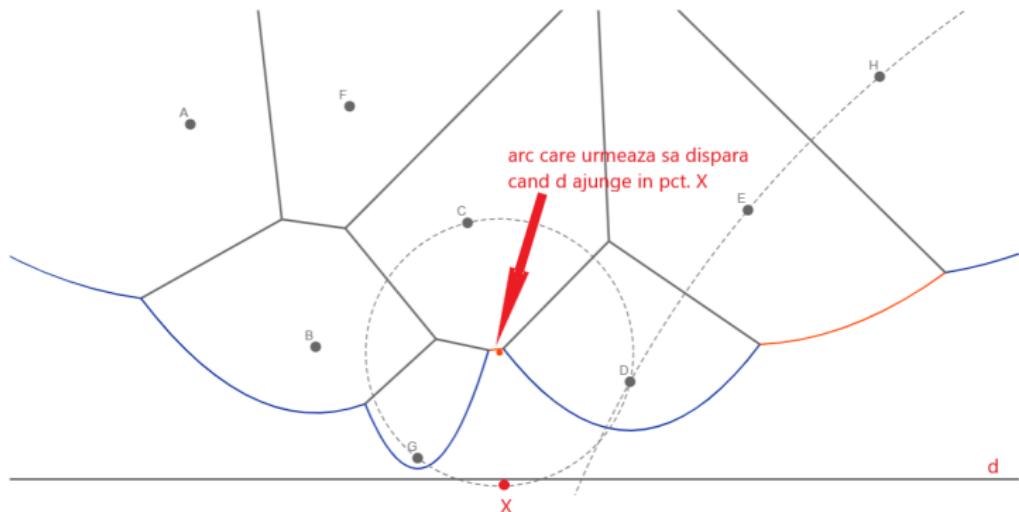
Despre curba parabolică (II) - modificarea curbei parabolice

Site event / eveniment de tip locație. (a) La trecerea printr-un sit apare un arc de parabolă (care “la început” este degenerat) și, reciproc, apariția unui nou arc este posibilă doar la trecerea printr-un sit. (b) Cum stabilim algoritmic / numeric ce arc de parabolă este “splitat”? - v. figura de mai jos. Pentru o poziție fixată a dreptei de baleiere pot fi determinate coordonatele proiecțiilor punctelor de racord dintre arcele de parabolă pe dreapta de baleiere și, în particular, poate fi găsit arcul de parabolă situat deasupra unui eveniment. (c) La un moment fixat, curba parabolică are maxim $(2n - 1)$ arce.



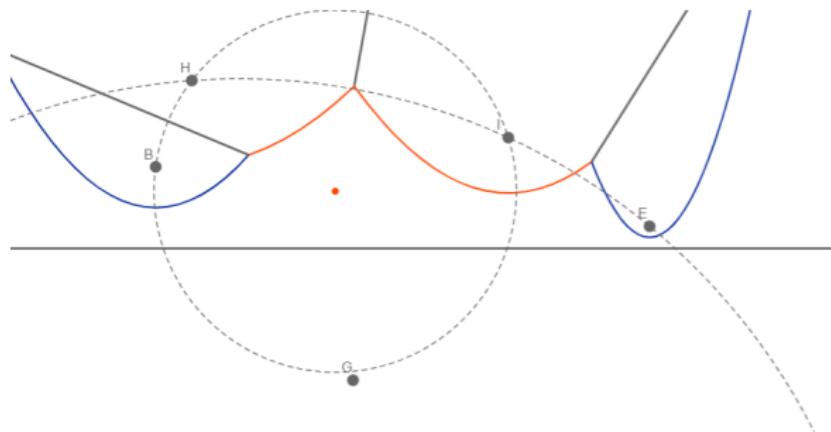
Despre curba parabolică (II) - modificarea curbei parabolice

Circle event / eveniment de tip cerc. (a) La întâlnirea punctului inferior al unui cerc care trece prin cel puțin trei situri și este tangent la dreapta de baleiere dispare un arc de parabolă și, reciproc, arcele de parabolă dispar doar la acest tip de evenimente. În figură este cercul dat de punctele G, C, D . Arcul care dispare este cel corespunzător punctului C . Un astfel de eveniment este asociat unui vîrf al diagramei Voronoi.



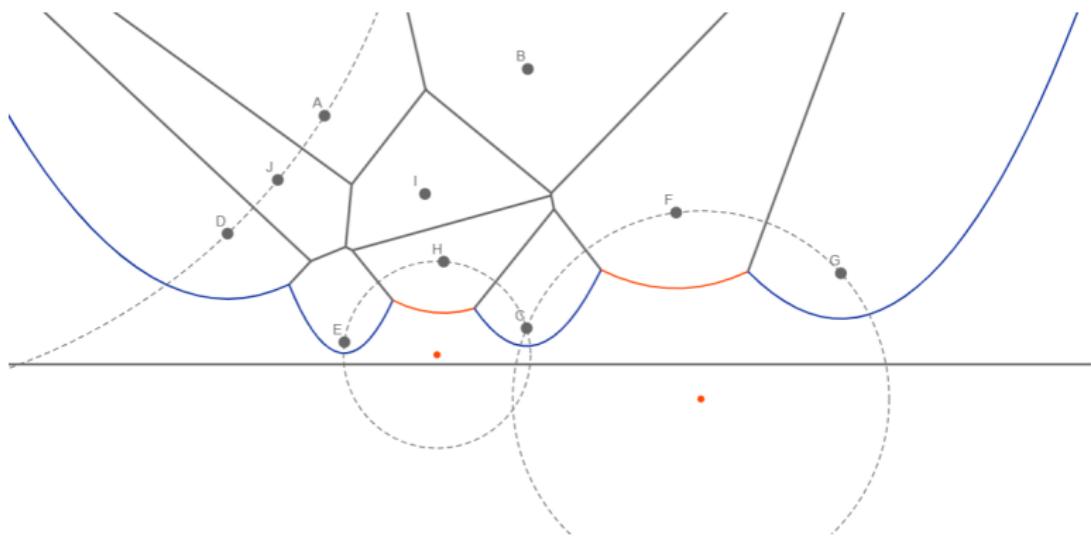
Despre curba parabolică (II) - modificarea curbei parabolice

Circle event / eveniment de tip cerc. (b) Un eveniment de tip cerc este dat de trei arce de parabolă consecutive de pe curba parabolică, deci trebuie testate toate tripletele consecutive de arce, pe măsură ce ele apar. În figură, evenimentele de tip cerc “active” sunt $\mathcal{C}_{(HIE)}$ și $\mathcal{C}_{(BHI)}$.



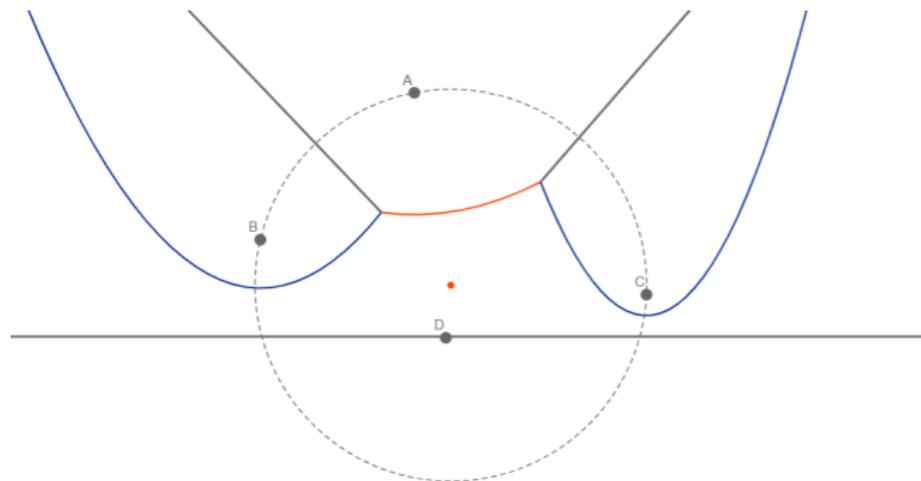
Despre curba parabolică (II) - modificarea curbei parabolice

Circle event / eveniment de tip cerc. (c) Există triplete de arce consecutive (muchii ale diagramei Voronoi) pentru care muchiile nu se întâlnesc. În figură, de exemplu, această afirmație se aplică arcelor determinate de punctele D , E și H .



Despre curba parabolică (II) - modificarea curbei parabolice

Circle event / eveniment de tip cerc. (d) Unele evenimente de tip cerc detectate nu au loc. În figură, evenimentul de tip cerc corespunzător $\mathcal{C}_{(ABC)}$ nu va avea loc. Arcul de parabolă corespunzător va fi “splitat” la evenimentul de tip locație D .



Adaptarea paradigmăi dreptei de baleiere - formalizare

- ▶ **Statut:** structura curbei parabolice (succesiunea de arce de parabolă - se subînțelege că este reținută ordinea arcelor); este modificat de două tipuri de evenimente
- ▶ **Evenimente:**
 - ▶ site event / eveniment de tip locație: întâlnirea unui sit, adică a unui punct din mulțimea \mathcal{P} (apare un arc de parabolă)
 - ▶ circle event / eveniment de tip cerc: întâlnirea unui “punct inferior” al unui cerc care trece prin cel puțin trei situri, tangent la dreapta de baleiere (dispare un arc de parabolă) - **vârf al diagramei Voronoi**

Structuri de date utilizate

- ▶ **Diagrama Voronoi:** *doubly connected edge list (DCEL) \mathcal{D}* (ulterior).
- ▶ **Evenimente:** coadă de priorități / evenimente \mathcal{Q} și arbore de căutare binar echilibrat. Sunt reținute evenimentele de tip sit, precum și evenimentele de tip cerc - detectate pe parcursul algoritmului.
- ▶ **Statut:** Structura curbei parabolice - arbore de căutare binar echilibrat \mathcal{T} .
 - ▶ **pe frunze:** siturile care au arce active, la ajungerea într-un sit se inserează un arc, iar la un eveniment de tip cerc se șterge un arc;
 - ▶ **în nodurile interne:** punctele de racord ale arcelor de parabolă (memorate simbolic) - corespund muchiilor diagramei Voronoi
 - ▶ pointeri (eventual nuli) de la frunze către evenimentele de tip cerc; de la nodurile interne către muchiile diagramei Voronoi
- ▶ **Analiză preliminară a complexității:** (i) Câte evenimente sunt în total? (ii) Care este complexitatea-timp pentru a actualiza coada de evenimente la un eveniment de tip cerc? (iii) Care este complexitatea-timp (totală) pentru a actualiza coada de evenimente? (iv) Întrebări similare pentru statut.

Algoritmul

Input. O mulțime de situri $\mathcal{P} = \{p_1, \dots, p_n\}$ de situri în plan.

Output. Diagrama Voronoi $\text{Vor}(\mathcal{P})$ în interiorul unui *bounding box*, descrisă printr-o listă dublu înlăncuită \mathcal{D} .

1. Initializări: coada de evenimente $\mathcal{Q} \leftarrow \mathcal{P}$ (preprocesare: ordonare după y), statut (arbore balansat) $\mathcal{T} \leftarrow \emptyset$; listă dublu înlăncuită $\mathcal{D} \leftarrow \emptyset$.
2. **while** $\mathcal{Q} \neq \emptyset$
3. **do** elimină evenimentul cu cel mai mare y din \mathcal{Q}
4. **if** evenimentul **ev** este un eveniment de tip sit
5. **then** $\text{PROCESSEvSIT}(p_i)$, cu $p_i = \mathbf{ev}$
6. **else** $\text{PROCESSEvCERC}(\gamma)$, cu $\gamma = \text{arc}(\mathbf{ev}) \in \mathcal{T}$
7. Nodurile interne încă prezente în \mathcal{T} corespund semidreptelor diagramei Voronoi.
Consideră un *bounding box* care conține toate vârfurile diagramei Voronoi în interiorul său și leagă semidreptele de acest *bounding box*, prin actualizarea corespunzătoare a lui \mathcal{D} .
8. Traversează muchiile pentru a adăuga celulele diagramei și pointeri corespunzători.

Procedura PROCESSEvSIT (p_i)

1. Dacă \mathcal{T} este vidă, inserează p_i și revine, dacă nu continuă cu 2.–5.
2. Caută în \mathcal{T} arcul α situat deasupra lui p_i . Dacă frunza reprezentând α are un pointer către un eveniment de tip cerc **ev** din \mathcal{Q} , atunci **ev** este o alarmă falsă și trebuie șters.
3. Înlocuiește frunza lui \mathcal{T} care reprezintă α cu un subarbore cu trei frunze: cea din mijloc reține situl p_i și celelalte două situl p_j asociat lui α . Memorează perechile reprezentând punctele de racord în două noduri interne. Efectuează rebalansări în \mathcal{T} , dacă este necesar.
4. Generează noi înregistrări de tip semi-muchie în structura diagramei Voronoi (\mathcal{D}), pentru muchiile care separă celulele $V(p_i)$ și $V(p_j)$, corespunzând celor două noi puncte de racord.
5. Verifică tripletele de arce consecutive nou create, pentru a verifica dacă muchiile corespunzătoare punctelor de racord se întâlnesc. Dacă da, inserează evenimente de tip cerc în \mathcal{Q} și adaugă pointeri de la nodurile lui \mathcal{T} la evenimentele corespunzătoare din \mathcal{Q} .

Procedura PROCESSEVERCC(γ)

1. Șterge frunza $\gamma \in \mathcal{T}$ care corespunde arcului de cerc α care dispare. Actualizează în nodurile interne perechile care corespund punctelor de racord. Efectuează rebalansări în \mathcal{T} , dacă este necesar. Șterge toate evenimentele de tip cerc care îi corespund lui α (cu ajutorul pointerilor de la predecesorul și succesorul lui γ în \mathcal{T}).
2. Adaugă centrul cercului care determină evenimentul ca înregistrare de tip vârf în \mathcal{D} . Creează înregistrări de tip semi-muchie corespunzând noului punct de racord de pe linia parabolică și asignează pointeri corespunzători.
3. Verifică tripletele de arce consecutive nou create (care au foștii vecini ai lui α în centru), pentru a verifica dacă muchiile corespunzătoare punctelor de racord se întâlnesc. Dacă da, inserează evenimente de tip cerc în \mathcal{Q} și adaugă pointeri de la nodurile lui \mathcal{T} la evenimentele corespunzătoare din \mathcal{Q} .

Rezultate principale

- ▶ **Teoremă.** *Diagrama Voronoi a unei mulțimi de n situri poate fi determinată cu un algoritm bazat pe paradigma dreptei de baleiere având complexitate-timp $O(n \log n)$ și complexitate-spațiu $O(n)$.*
- ▶ **Teoremă.** *Triangularea Delaunay a unei mulțimi de n situri poate fi determinată cu un algoritm bazat pe paradigma dreptei de baleiere având complexitate-timp $O(n \log n)$ și complexitate-spațiu $O(n)$.*

Scurt rezumat

- ▶ Conceptul de diagramă Voronoi. Aspecte cantitative legate de numărul de vârfuri/muchii/muchii de tip semidreaptă (și la seminar).
- ▶ Legătura cu triangulările unghiular optime.
- ▶ Algoritmul lui Fortune.

Alte referințe

Algorithms for Competitive Programming: Diagrame Voronoi și triangulări Delaunay

B. Kornberger, *GeomSoftware*

CGAL: Triangulări Delaunay și diagrame Voronoi (detalii, implementare)

ICPC World Finals 2018, Problem G Panda Preserve: (i) enunț, (ii) indicații soluție

Algoritmi avansați

C12 - Intersecții

Mihai-Sorin Stupariu

Sem. al II-lea, 2024 - 2025

Intersecția segmentelor (generalități)

Analiza complexității algebrice

Algoritm - comentarii inițiale

Metoda dreptei de baleiere

Alte rezultate

Subdiviziuni planare. DCEL

Motivație (Probleme geometrice în context 2D)

- ▶ **Problema 1.** Dată o listă (mulțime ordonată) de puncte $\mathcal{P} = (P_1, P_2, \dots, P_m)$, să se stabilească dacă ea reprezintă un poligon (linie poligonală fără autointersecții).
- ▶ **Problema 2.** Date două poligoane \mathcal{P} și \mathcal{Q} , să se stabilească dacă se intersectează (interioarele lor se intersectează).
- ▶ **Problema 3.** Dată o mulțime $\mathcal{S} = \{s_1, \dots, s_n\}$ de n segmente închise din plan, să se determine toate perechile care se intersectează.
- ▶ **Problema 3'.** Dată o mulțime $\mathcal{S} = \{s_1, \dots, s_n\}$ de n segmente închise din plan, să se determine toate punctele de intersecție dintre ele.

Determinarea complexității algebrice (I)

- ▶ Determinarea complexității algebrice revine la a stabili natura calculelor care trebuie efectuate / a expresiilor care trebuie evaluate pentru a rezolva o problemă (polinoame de un anumit grad, rapoarte de polinoame, etc.). Nu interesează de câte ori se repetă un anumit tip de calcule, ci cât de complexe sunt acestea. Pentru problema analizată considerăm două segmente $[AB]$ și $[CD]$, cu coordonate $A = (x_A, y_A), B = (x_B, y_B), C = (x_C, y_C), D = (x_D, y_D)$.
- ▶ Dacă segmentele $[AB]$ și $[CD]$ nu sunt incluse în aceeași dreaptă, atunci ele se intersectează $\Leftrightarrow A$ și B sunt de o parte și de alta a lui CD și $\Leftrightarrow C$ și D sunt de o parte și de alta a lui AB . Aceasta revine la a aplica testul de orientare → **polinoame de gradul II**.
- ▶ De stabilit cum se procedează dacă segmentele sunt incluse în aceeași dreaptă.

Determinarea complexității algebrice (IIa)

- ▶ Pentru a **determina explicit** punctul de intersecție dintre două segmente $[AB]$ și $[CD]$: un punct M este atât pe segmentul $[AB]$, cât și pe segmentul $[CD] \Leftrightarrow$ există $\lambda, \mu \in [0, 1]$ astfel ca

$$M = (1 - \lambda)A + \lambda B = (1 - \mu)C + \mu D \quad (1)$$

(am scris punctul M ca fiind atât o combinație convexă a lui A și B , cât și o combinație convexă a lui C și D).

- ▶ Ecuația (1) se scrie în coordonate

$$\begin{cases} x_M = (1 - \lambda)x_A + \lambda x_B = (1 - \mu)x_C + \mu x_D \\ y_M = (1 - \lambda)y_A + \lambda y_B = (1 - \mu)y_C + \mu y_D \end{cases} \quad (2)$$

Am obținut sistemul (2) de două ecuații cu două necunoscute (λ, μ), care poate fi rescris sub forma

$$\begin{cases} (x_B - x_A)\lambda + (x_D - x_C)\mu = x_C - x_A \\ (y_B - y_A)\lambda + (y_D - y_C)\mu = y_C - y_A \end{cases} \quad (3)$$

Determinarea complexității algebrice (IIa)

- ▶ Pentru sistemul (2), determinantul

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_B - x_A & x_D - x_C \\ y_B - y_A & y_D - y_C \end{vmatrix} = (x_B - x_A)(y_D - y_C) - (y_B - y_A)(x_D - x_C)$$

este un polinom de gradul II. Dreptele AB și CD se intersecează într-un singur punct $\Leftrightarrow \Delta \neq 0$.

- ▶ Dacă $\Delta \neq 0$, atunci

$$\lambda = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} x_C - x_A & x_D - x_C \\ y_C - y_A & y_D - y_C \end{vmatrix}, \quad \mu = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} x_B - x_A & x_C - x_A \\ y_B - y_A & y_C - y_A \end{vmatrix},$$

deci calculul soluțiilor λ și μ ale sistemului (2) revine la evaluarea unor rapoarte de forma $\frac{\text{polinom de gradul II}}{\text{polinom de gradul II}}$. Mai trebuie verificat faptul că $\lambda, \mu \in [0, 1]$.

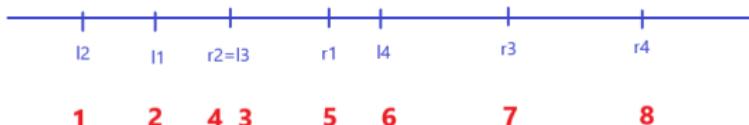
- ▶ În final, prin înlocuirea lui λ și μ în sistemul (2), se găsesc coordonatele punctului de intersecție $\rightarrow \frac{\text{polinom de gradul III}}{\text{polinom de gradul II}}$.

Algoritmul trivial

- ▶ **Idee de lucru:** Sunt considerate toate perechile de segmente și se determină cele care se intersectează / se calculează punctele de intersecție.
- ▶ **Complexitate:**
 - ▶ timp: $O(n^2)$
 - ▶ memorie: $O(n)$
 - ▶ algebric: polinoame de gradul II (Problema 3), rapoarte de polinoame (Problema 3')
- ▶ **Comentariu:** În anumite cazuri: optim (dacă toate segmentele se intersectează).
- ▶ Algoritmi mai eficienți (*output / intersection sensitive*)?

Rezolvarea problemei în context 1D

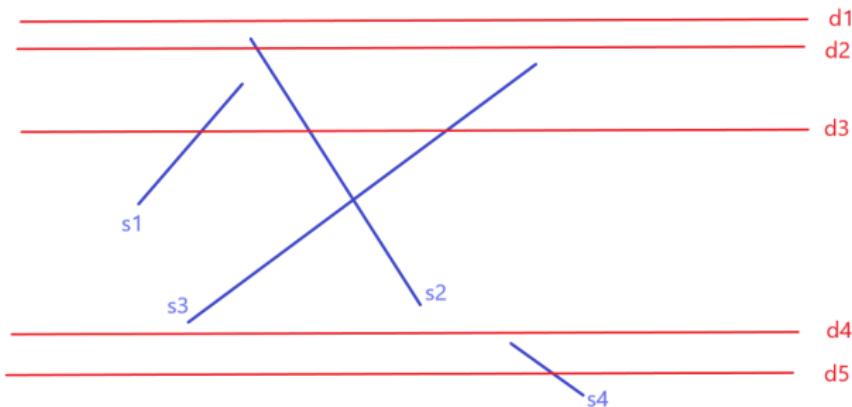
- ▶ Se dă segmentele $[l_i, r_i]$ ($i = 1, \dots, n$). Mai întâi este realizată ordonarea lexicografică a extremităților segmentelor / intervalelor într-o listă \mathcal{P} .



- ▶ Lista \mathcal{P} este parcursă (crescător); lista \mathcal{L} a segmentelor care conțin punctul curent din \mathcal{P} este actualizată:
 - ▶ dacă punctul curent este marginea din stânga a unui segment s , atunci s este adăugat la listă \mathcal{L}
 - ▶ dacă punctul curent este marginea din dreapta a unui segment s , atunci s este șters din \mathcal{L} și se rapoartează intersecții între s și toate segmentele din \mathcal{L}
- ▶ **Teoremă.** Algoritmul are complexitate $O(n \log n + k)$ și necesită $O(n)$ memorie (k este numărul de perechi ce se intersecțează).

Un prim algoritm

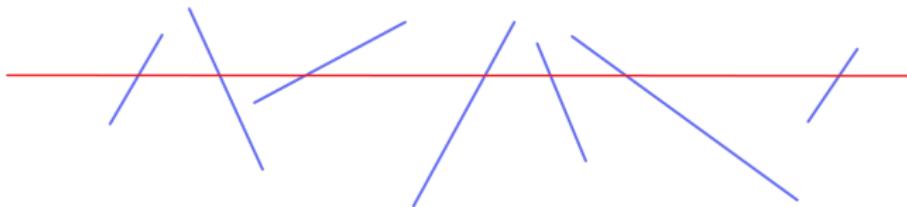
Dreapta de baleiere d : **orizontală**, astfel că toate intersecțiile situate deasupra dreptei de baleiere au fost detectate. **Statutul**: mulțimea segmentelor care intersectează d . Pentru aceste segmente se testează efectiv dacă se intersectează sau nu. **Evenimente** : capetele segmentelor → actualizarea statutului.



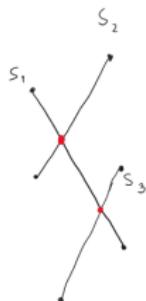
Statutul dreptelor din figură. $d_1 : \emptyset$; $d_2 : s_2$; $d_3 : s_1, s_2, s_3$; $d_4 : \emptyset$; $d_5 : s_4$.

Un prim algoritm

Obs. Sunt testate pentru intersecție segmente care intersectează, la un moment dat, dreapta de baleiere $d \rightarrow$ (sunt testate segmentele care sunt "aproape" de-a lungul axei Oy) \rightarrow încă ineficient.



Statut - posibile abordări



Varianta 1

Statutul = mulțime

Eveniment	Statut
u_{s_2}	\emptyset
u_{s_1}	$\{s_2\}$
u_{s_3}	$\{s_1, s_2\}$
u_{s_1, s_2}	$\{s_1, s_2, s_3\}$
d_{s_2}	$\{s_1, s_3\}$
d_{s_1}	$\{s_2\}$
d_{s_3}	\emptyset

Varianta 2

Statutul = listă
(mulțime ordonată)

Eveniment	Statut
u_{s_2}	\emptyset
u_{s_1}	(s_2)
u_{s_3}	(s_1, s_2)
u_{s_1, s_2}	(s_1, s_2, s_3)
d_{s_2}	(s_1, s_3)
d_{s_1}	(s_2)
d_{s_3}	\emptyset

insertat	s_1, s_2	$s_1, s_2, ?$
	s_1, s_2	(s_2, s_1)
	s_1, s_3	(s_2, s_1, s_3)
	d_{s_2}	(s_1, s_3)
	s_1, s_3	(s_3, s_1)
	d_{s_1}	(s_3)
	d_{s_3}	\emptyset

Pentru segmentele s_1, s_2, s_3 din figură sunt prezentate două variante pentru statut.

Marginea superioară a segmentului s este notată cu u_s , iar cea inferioară cu d_s .

În tabelul din stânga statutul este o mulțime (nu se ține cont de ordinea segmentelor), iar în tabelul din dreapta statutul este o listă (o mulțime ordonată, ordinea elementelor fiind relevantă). În varianta 2 (statutul=listă), punctele de intersecție devin și ele evenimente și trebuie inserate în coada de evenimente.

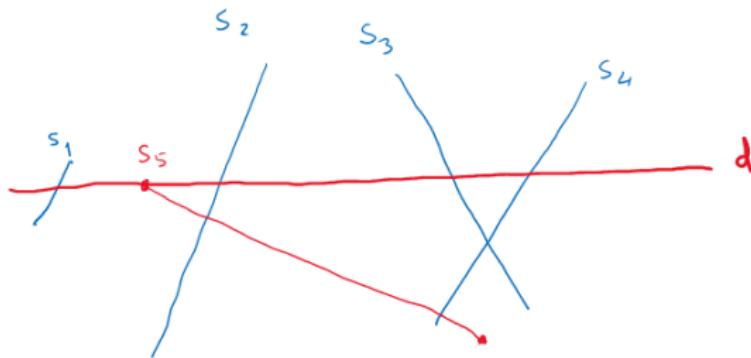
Un algoritm eficient [Bentley și Ottmann, 1979; Mehlhorn și Näher, 1994]

- ▶ **Idee de lucru:** ordonare (segmente, evenimente).
 - ▶ Segmentele: ordonate folosind extremitățile superioare (lexicografic, x apoi y).
 - ▶ Evenimente (puncte): (lexicografic, y apoi x).
 - ▶ Statutul: **listă** (mulțime ordonată)
- ▶ **Avantaj:** în momentul modificării statutului, sunt testate intersecțiile doar în raport cu vecinii din listă (sunt testate segmentele care sunt "aproape" de-a lungul axei Ox).
- ▶ **Fundamental:** Punctele de intersecție devin, la rândul lor, evenimente, deoarece schimbă ordinea segmentelor care le determină → chiar dacă nu sunt determinate explicit, trebuie inserate în lista de evenimente (compararea coordonatelor poate necesita utilizarea unor polinoame de gradul V)

3 tipuri de evenimente

- ▶ Marginea superioară a unui segment
 - ▶ apare un nou segment în statutul liniei de baleiere, ce trebuie inserat corespunzător
 - ▶ testat, în raport cu vecinii, dacă au puncte de intersecție sub linia de baleiere → vor deveni ulterior evenimente
- ▶ Marginea inferioară a unui segment
 - ▶ eliminat un segment din statutul liniei de baleiere
 - ▶ testare pentru segmentele vecine nou apărute
- ▶ punctele de intersecție (inserate în mod corespunzător pe parcurs)
 - ▶ segmentele care le determină trebuie "inversate" în statutul liniei de baleiere
 - ▶ testare pentru segmentele vecine nou apărute

Evenimente de tip margine superioară



Evenimentul u_{s_5} :

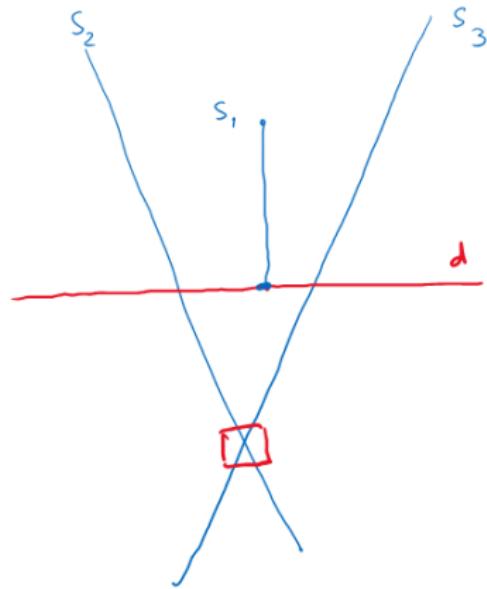
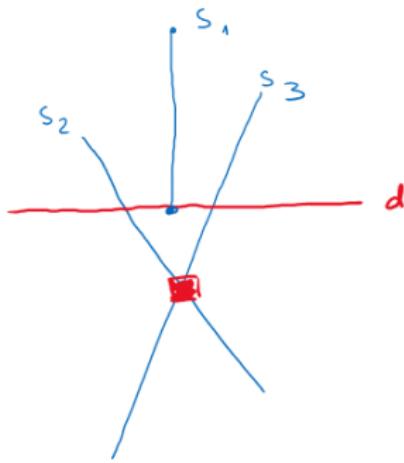
$$(s_1, s_2, s_3, s_4)$$

$$\downarrow \quad u_{s_5}$$

$$(s_1, \underline{s_5}, s_2, s_3, s_4)$$

La evenimentul u_{s_5} statutul se modifică de la (s_1, s_2, s_3, s_4) la $(s_1, \underline{s_5}, s_2, s_3, s_4)$. De asemenea, sunt efectuate teste de intersecție **între vecinii nou apărăți**. Astfel, s_1 și s_5 nu se intersectează, în schimb s_5 și s_2 se intersectează, fiind inserat un nou eveniment $(s_5 \cap s_2)$.

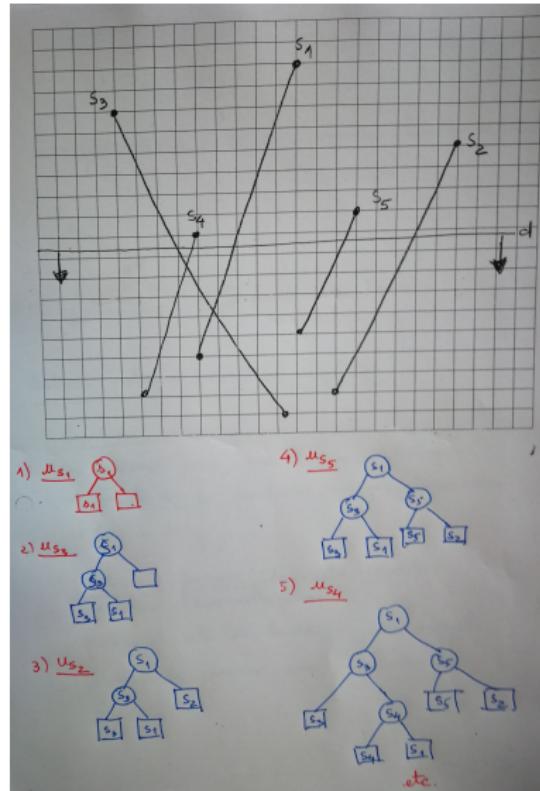
Evenimente de tip margine inferioară



Evenimentul analizat este d_{s_1} . În figura din stânga, evenimentul $s_2 \cap s_3$ nu a fost detectat anterior și este adăugat în lista de evenimente. În figura din dreapta, evenimentul $s_2 \cap s_3$ a fost detectat anterior, încrât s_2 și s_3 au fost vecine în statut înainte de evenimentul u_{s_1} .

Implementare: structuri de date utilizate

- ▶ \mathcal{Q} – **coada/lista de evenimente** (*event queue*)
 - ▶ puncte, ordonate lexicografic, după y apoi x; memorată într-un arbore de căutare binar echilibrat (*balanced binary search tree*)
 - ▶ evenimentele nou detectate trebuie inserate în mod corespunzător!
 - ▶ de evaluat: complexitatea-timp (pentru o inserare, numărul de repetiții); complexitatea spațiu
- ▶ \mathcal{T} – **statut**: arbore de căutare binar echilibrat
 - ▶ pe frunze: segmente, este reținută ordinea segmentelor de la stânga la dreapta
 - ▶ în nodurile interne: segmente, privite ca elemente de ghidare
 - ▶ de evaluat: complexitatea-timp (pentru o actualizare, numărul de repetiții)



Algoritm INTERSECTII

- ▶ **Input.** O mulțime de segmente din planul \mathbb{R}^2 .
 - ▶ **Output.** Mulțimea punctelor de intersecție (explicit sau doar formal); pentru fiecare punct precizează segmentele pe care se găsește.
1. $Q \leftarrow \emptyset$. Inserează extremitățile segmentelor în Q ; împreună cu marginea superioară a unui segment memorează și segmentul
 2. $T \leftarrow \emptyset$.
 3. **while** $Q \neq \emptyset$
 4. **do** determină evenimentul p care urmează în Q și îl șterge
 5. ANALIZEAZA (p)

ANALIZEAZA (p)

1. Fie $U(p)$ mulțimea segmentelor a căror extremitate superioară este p (pentru cele orizontale este marginea din stânga) - stocată cu p în \mathcal{Q} .
2. Determină toate segmentele care conțin p : sunt adiacente în \mathcal{T} (de ce?) Fie $D(p)$, respectiv $Int(p)$, mulțimea segmentelor care au p drept margine inferioară, respectiv conțin p în interior.
3. **if** $U(p) \cup D(p) \cup Int(p)$ conține mai mult de un segment
4. **then** raportează p ca punct de intersecție, împreună cu segmentele din $U(p)$, $D(p)$, $Int(p)$

ANALIZEAZA (p)

5. șterge segmentele din $D(p) \cup Int(p)$ din \mathcal{T}

ANALIZEAZA (p)

5. șterge segmentele din $D(p) \cup Int(p)$ din \mathcal{T}
6. inserează segmentele din $U(p) \cup Int(p)$ în \mathcal{T} (ordinea segmentelor pe frunzele lui \mathcal{T} coincide cu ordinea în care sunt intersectate de o linie de baleiere situată imediat sub p)

ANALIZEAZA (p)

7. **if** $U(p) \cup Int(p) = \emptyset$
8. **then** fie s_l și s_r vecinii din stânga/dreapta ai lui p din \mathcal{T}
9. DETERMINAEVENTIMENT (s_l, s_r, p)
10. **else** fie s' din $U(p) \cup Int(p)$ cel mai în stânga în \mathcal{T}
11. fie s_l vecinul din stânga al lui p
12. DETERMINAEVENTIMENT (s_l, s', p)
13. fie s'' din $U(p) \cup Int(p)$ cel mai în dreapta în \mathcal{T}
14. fie s_r vecinul din dreapta al lui p
15. DETERMINAEVENTIMENT (s'', s_r, p)

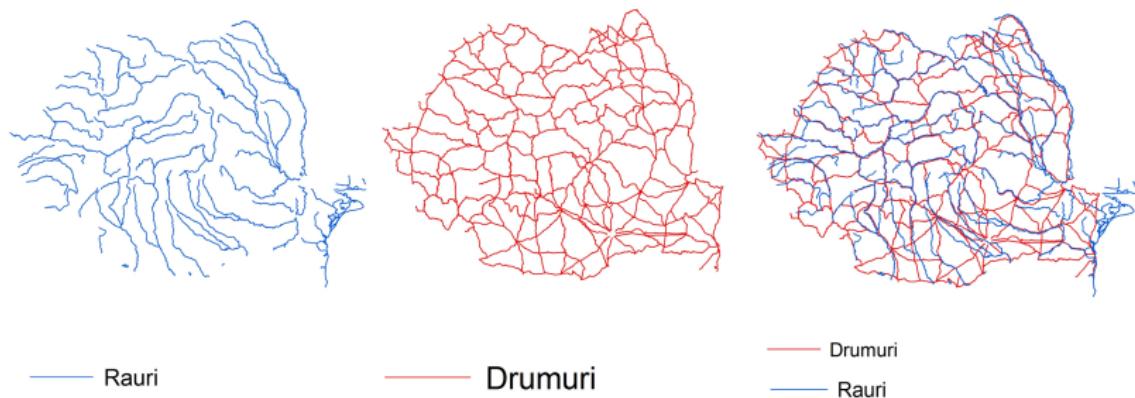
DETERMINA EVENIMENT (sgt_l, sgt_r, p)

1. **if** sgt_l și sgt_r se intersectează sub linia de baleiere sau pe linia de baleiere, dar la dreapta lui p și punctul de intersecție nu este deja în \mathcal{Q}
2. **then** inserează punctul de intersecție ca eveniment în \mathcal{Q}

Rezultatul principal (intersecții de segmente)

Teoremă. Fie S o mulțime care conține n segmente din planul \mathbb{R}^2 . Toate punctele de intersecție ale segmentelor din S , împreună cu segmentele corespunzătoare, pot fi determinate în $O(n \log n + I \log n)$ timp, folosind $O(n)$ spațiu (I este numărul punctelor de intersecție).

Suprapunerea unor segmente cu conținut tematic diferit



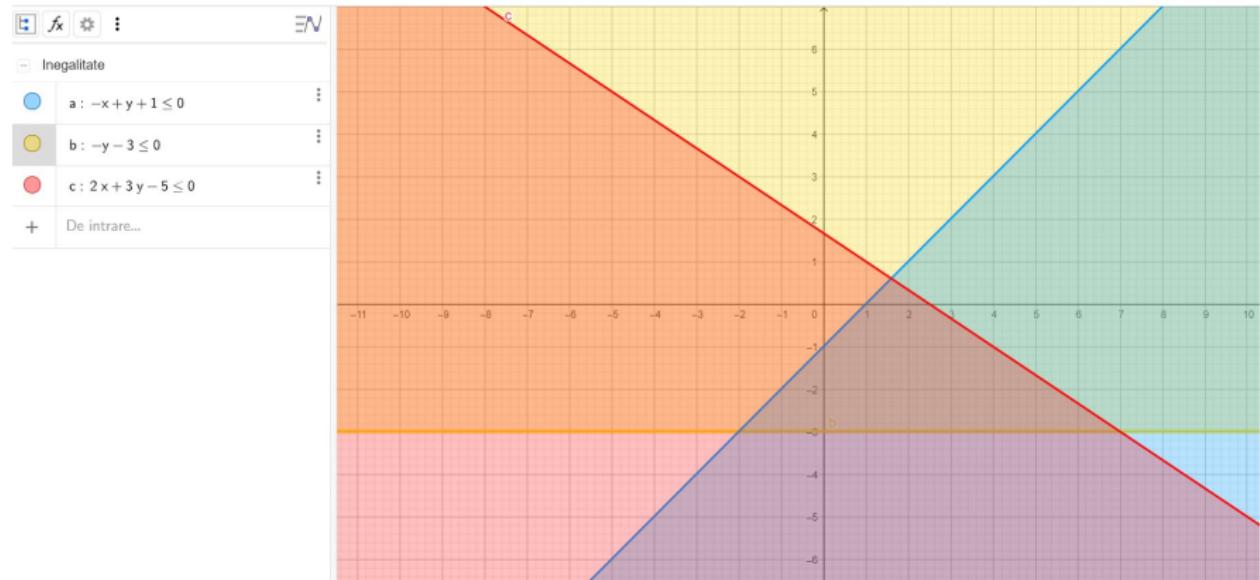
Red-blue intersections [Mairson și Stolfi, 1988; Mantler și Snoeyink, 2000]

Teoremă. Pentru două mulțimi R și B de segmente din \mathbb{R}^2 având interioare disjuncte, perechile de segmente ce se intersectează pot fi determinate în $O(n \log n + k)$ timp și spațiu liniar, folosind predicate (polinoame) de grad cel mult II ($n = |R| + |B|$) și k este numărul perechilor ce se intersectează).

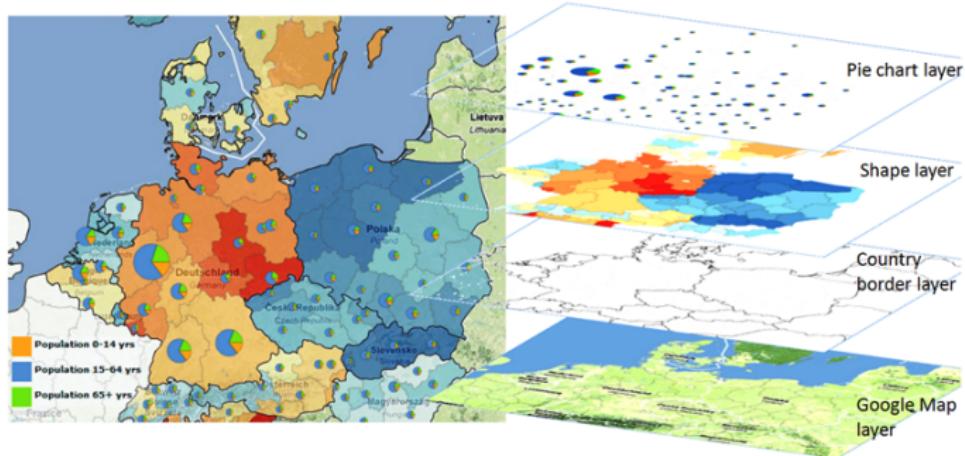
Motivație - reprezentarea diagramelor Voronoi



Motivație - reprezentarea intersecțiilor de semiplane



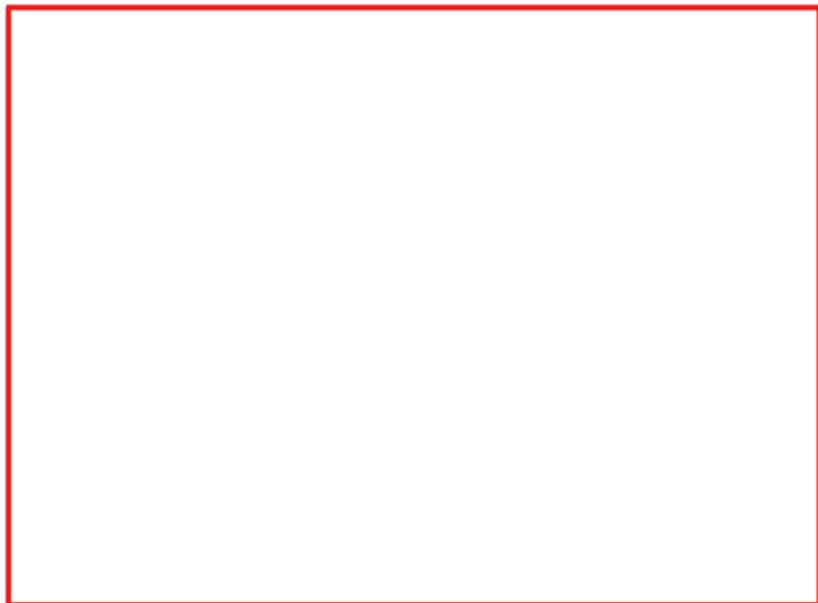
Motivație - reprezentarea datelor geo-spațiale



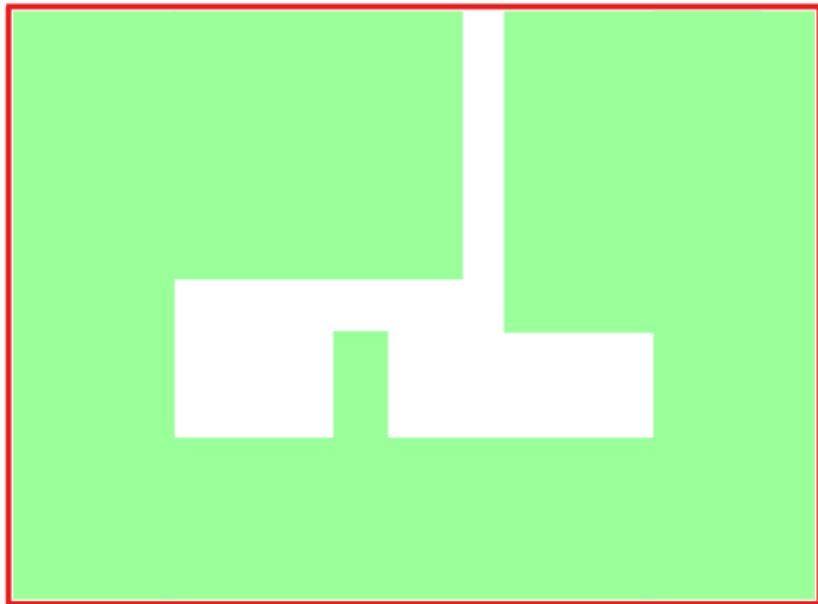
Sursa: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/37/90/86/37908600ab7db99c424c3bc6e1ddb740.jpg>

Ce structură de date este adecvată pentru a memora astfel de informații?

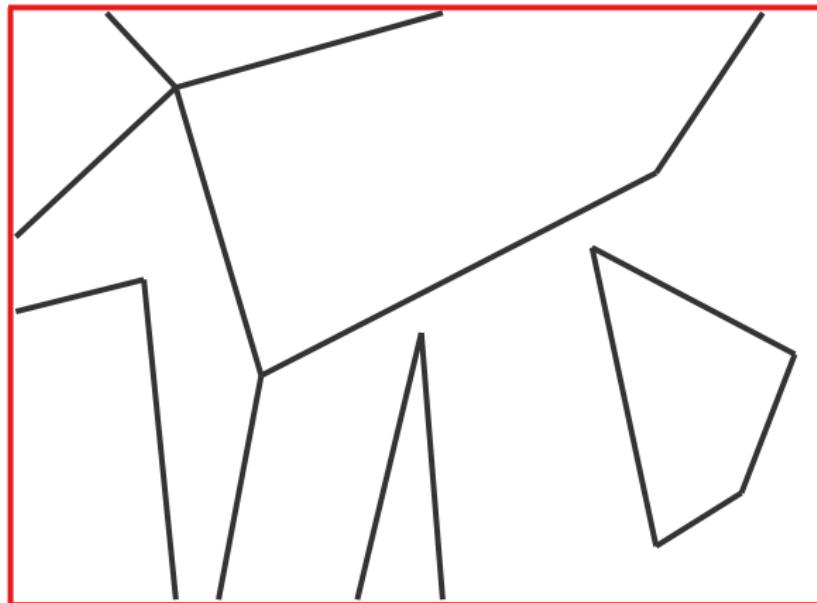
Problematizare



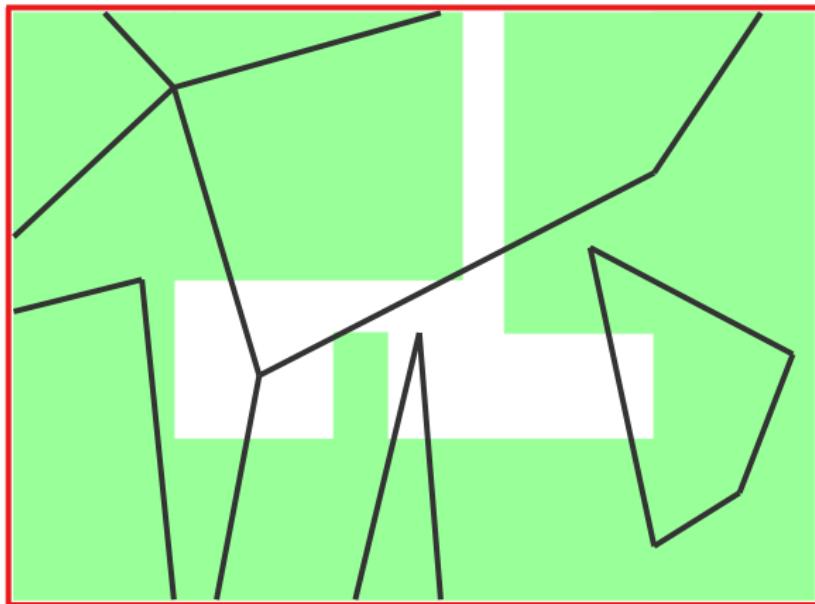
Problematizare



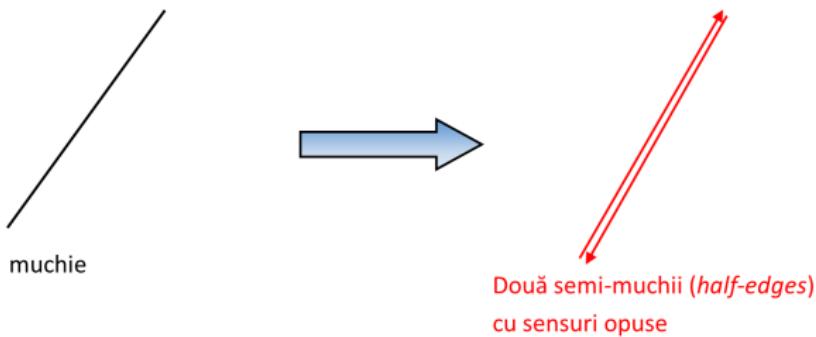
Problematizare



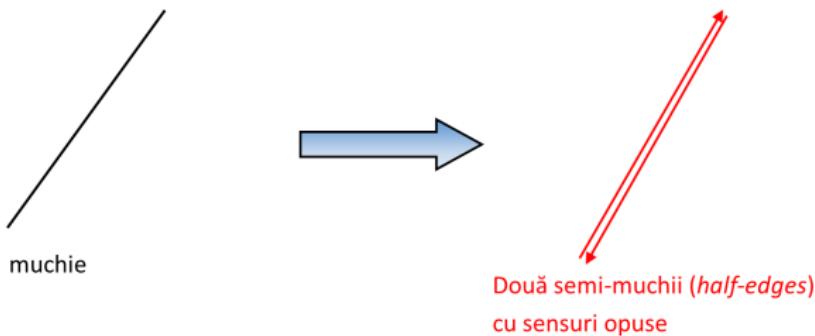
Problematizare



Ideea cheie

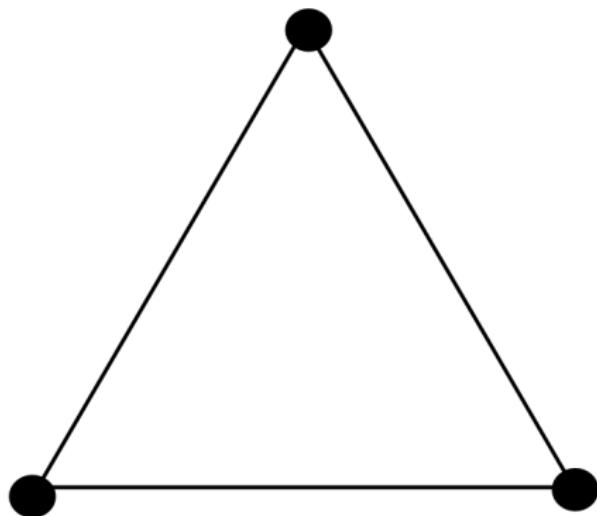


Ideea cheie

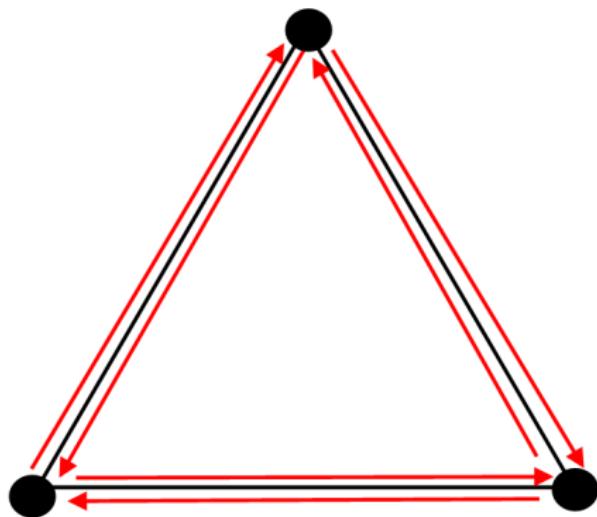


- ▶ Ideea fundamentală este de a introduce conceptul de semi-muchie (muchie orientată), cf. “*half-edge*”.

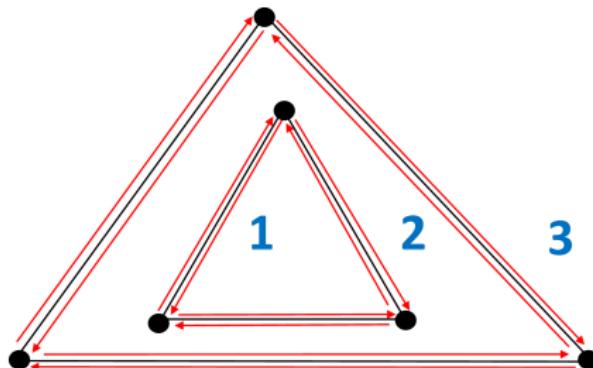
Exemplu



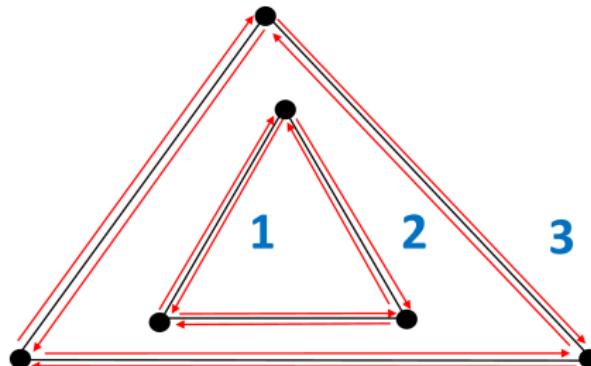
Exemplu



Exemplu

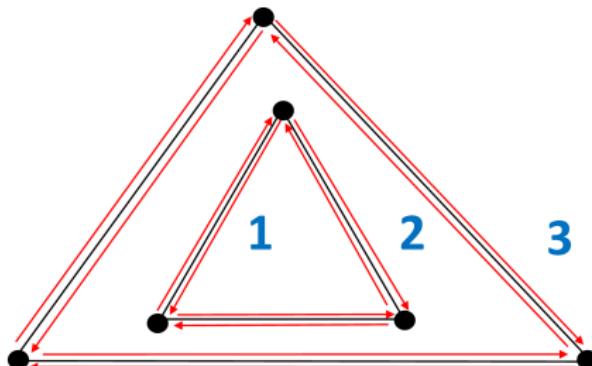


Exemplu



Subdiviziunea din figură are 6 vârfuri, 12 semi-muchii, 3 fețe.

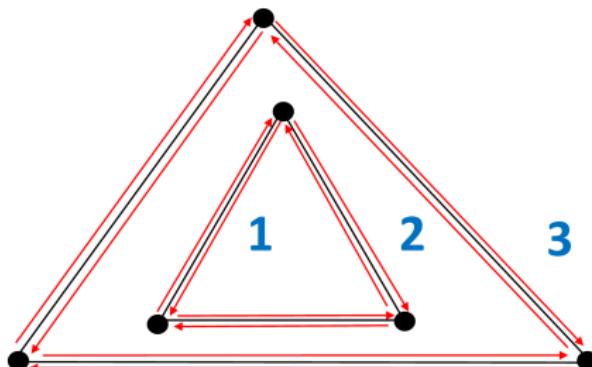
Exemplu



Subdiviziunea din figură are 6 vârfuri, 12 semi-muchii, 3 fețe.

Semi-muchiile delimită frontiere ale fețelor, față delimitată fiind la stânga.

Exemplu

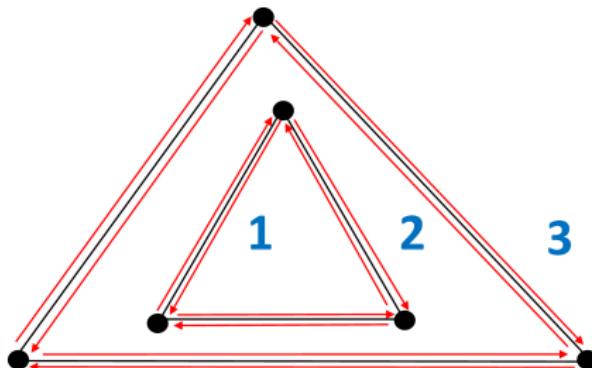


Subdiviziunea din figură are 6 vârfuri, 12 semi-muchii, 3 fețe.

Semi-muchiile delimită frontiere ale fețelor, față delimitată fiind la stânga.

Dat un poligon (eventual cu goluri):

Exemplu



Subdiviziunea din figură are 6 vârfuri, 12 semi-muchii, 3 fețe.

Semi-muchiile delimită frontiere ale fețelor, față delimitată fiind la stânga.

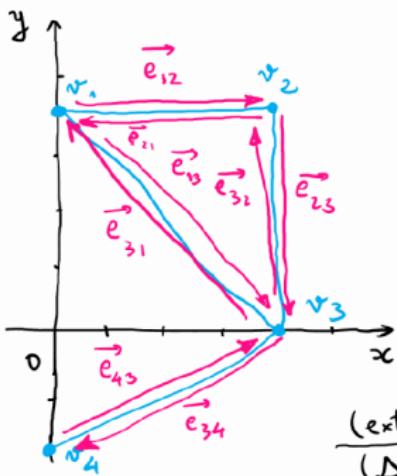
Dat un poligon (eventual cu goluri):

- ▶ **frontieră exterioară**, care poate fi parcursă cu ajutorul semi-muchiilor astfel încât poligonul să fie la stânga frontierei, iar virajele convexe să fie la stânga,
- ▶ **frontieră interioară** (dacă există goluri), caz în care poligonul este tot la stânga, dar virajele în vîrfurile convexe sunt la dreapta.

Subdiviziuni planare

- ▶ Conceptul de subdiviziune planară: vârfuri, muchii, fețe.
- ▶ **Listă de muchii dublu înlăntuite / DCEL - Doubly Connected Edge List** [Müller și Preparata, 1978] (trei înregistrări: vârfuri, fețe, muchii orientate (semi-muchii)).
 - ▶ **Vârf** v : coordonatele lui v în $\text{Coordinates}(v)$, pointer $\text{IncidentEdge}(v)$ spre o muchie orientată care are v ca origine
 - ▶ **Față** f : pointer $\text{OuterComponent}(f)$ spre o muchie orientată corespunzătoare frontierei externe (pentru fața nemărginită este **nil**); listă $\text{InnerComponents}(f)$, care conține, pentru fiecare gol, un pointer către una dintre muchiile orientate de pe frontieră
 - ▶ **Muchie orientată** \vec{e} : pointer $\text{Origin}(\vec{e})$, pointer $\text{Twin}(\vec{e})$ pointer $\text{IncidentFace}(\vec{e})$, pointer $\text{Next}(\vec{e})$, pointer $\text{Prev}(\vec{e})$.
- ▶ Oricărei subdiviziuni planare \mathcal{S} i se asociază o listă de muchii dublu înlăntuite $\mathcal{D}_{\mathcal{S}}$.
- ▶ **Obs.** Explicați cum, folosind pointerii de mai sus: (i) poate fi parcursă frontiera exterioară / interioară a unei fețe (a unui poligon); (ii) pot fi găsite toate semi-muchiile incidente cu un vârf.

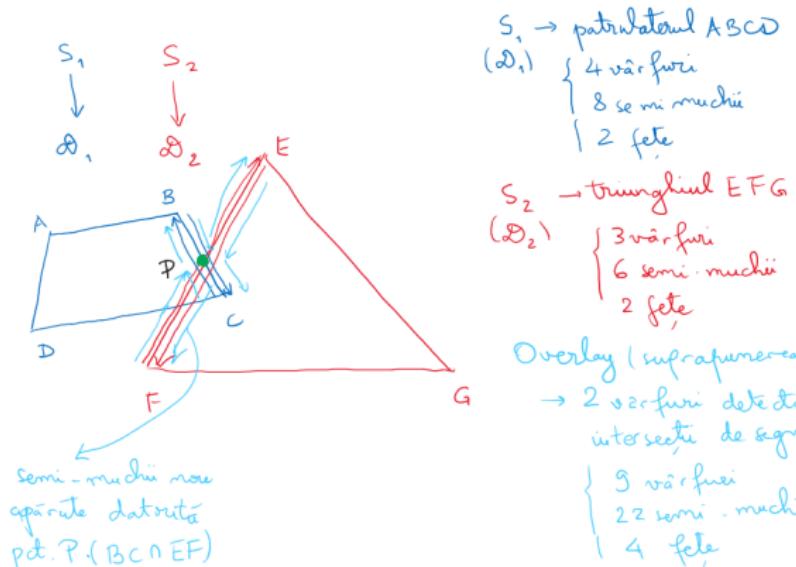
Exemplu



Vârf	Coordinate	Incident Edge	
v_1	$(0, 4)$	\vec{e}_{12}	
v_2	$(4, 4)$	\vec{e}_{23}	
v_3	$(4, 0)$	\vec{e}_{34}	
v_4	$(0, -2)$	\vec{e}_{43}	
	Fata (exterior)	Outer Component	Inner Component(s)
f_1	nil	\vec{e}_{12}	
f_2	\vec{e}_{23}	\vec{e}_{34}	\vec{e}_{43}

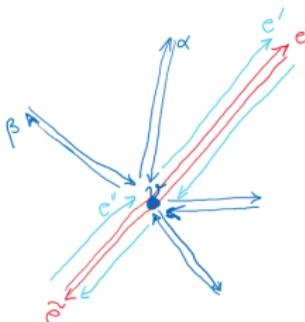
Semi - muchie	Origin	Termin	Incident Face	Next	Prev
\vec{e}_{12}	v_1	\vec{e}_{23}	f_1	\vec{e}_{23}	\vec{e}_{31}
\vec{e}_{23}	v_2	\vec{e}_{32}	f_1	\vec{e}_{34}	\vec{e}_{12}
\vec{e}_{34}	v_3	\vec{e}_{43}	f_2	\vec{e}_{43}	\vec{e}_{23}

Suprapunerea (Overlay) pentru subdiviziuni planare



În figură sunt considerate două subdiviziuni S_1, S_2 și structurile de tip DCEL asociate, fiind reprezentate doar semi-muchiile corespunzătoare muchiilor BC și EF . Datorită punctului de intersecție P , aceste semi-muchiile vor fi înlocuite cu alte perechi de semi-muchiile. În mod analog se procedează și pentru intersecția dintre CD și EF .

Actualizarea listei de semi-muchii



În exemplul din figură, prin vârful v al subdiviziunii S_1 (cu albastru) trece o muchie a subdiviziunii S_2 (cu roșu).

Actualizarea presupune definirea unor semi-muchii noi (sau păstrarea celor vechi, după caz), precum și definirea / actualizarea pointerilor asociați. La actualizare se ține cont de principiul *față delimitată de o muchie este la stânga acesteia*.

De exemplu, semi-muchia e este înlocuită cu două semi-muchii e' și e'' . Pentru e' pointerii asociați sunt: $Origin(e')=v$, $Twin(e')$ este legat de actualizarea lui \tilde{e} , $Next(e')=Next(e)$, $Prev(e')=\alpha$ (semi-muchia “cea mai apropiată de e' în sens trigonometric”). Pentru e'' pointerii asociați sunt: $Origin(e'')=Origin(e)$, $Twin(e'')$ este legat de actualizarea lui \tilde{e} , $Next(e'')=\beta$ (semi-muchia “cea mai apropiată de e'' în sens orar”), $Prev(e'')=Prev(e)$.

Algoritm SUPRAPUNERE ($\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2$)

- ▶ **Input.** Două subdiviziuni planare $\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2$ memorate în liste dublu înlăncuite $\mathcal{D}_{\mathcal{S}_1}, \mathcal{D}_{\mathcal{S}_2}$
 - ▶ **Output.** Overlay-ul $\mathcal{O}(\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2)$ dintre $\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2$, memorat într-o listă dublu înlăncuită $\mathcal{D}_{\mathcal{O}(\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2)}$
1. Copiază listele $\mathcal{D}_1, \mathcal{D}_2$ într-o nouă listă dublu înlăncuită $\mathcal{D}_{\mathcal{O}(\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2)}$
 2. Calculează toate intersecțiile de muchii dintre \mathcal{S}_1 și \mathcal{S}_2 cu algoritmul INTERSECTII. La fiecare eveniment, pe lângă actualizarea lui \mathcal{Q} și \mathcal{T} , efectuează:
 - ▶ Actualizează $\mathcal{D}_{\mathcal{O}(\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2)}$, în cazul în care evenimentul implică atât muchii ale lui \mathcal{S}_1 , cât și ale lui \mathcal{S}_2
 - ▶ Memorează noile muchii orientate adecvat

Algoritm SUPRAPUNERE ($\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2$)

3. Determină ciclii de frontieră din $\mathcal{O}(\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2)$, stabilește natura (exteriori/interiori)
4. Construiește graful \mathcal{G} ale cărui noduri corespund ciclilor de frontieră și ale cărui arce unesc fiecare ciclu corespunzând unui gol cu ciclul de la stânga vârfului cel mai din stânga și determină componentele conexe ale lui \mathcal{G}
5. **for** fiecare componentă a lui \mathcal{G}
6. **do** Fie \mathcal{C} unicul ciclu de frontieră exterioară a componentei și fie f față mărginită a ciclului. Creează o înregistrare pentru f , setează $OuterComponent(f)$ (către una din muchiile lui \mathcal{C}), construiește lista $InnerComponents(f)$ (pentru fiecare gol, pointer către una dintre muchiile orientate). Pentru fiecare muchie orientată, $IncidentFace()$ către înregistrarea lui f
7. Etichetează fiecare față a lui $\mathcal{O}(\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2)$

Rezultate principale

- ▶ **Teoremă. (Overlay-ul hărților)** Fie S_1 o subdiviziune de complexitate n_1 , S_2 o subdiviziune de complexitate n_2 , fie $n := n_1 + n_2$. Overlay-ul dintre S_1 și S_2 poate fi construit în $O(n \log n + k \log n)$, unde k este complexitatea overlay-ului.
- ▶ **Corolar. (Operații boolene)** Fie \mathcal{P}_1 un poligon cu n_1 vârfuri și \mathcal{P}_2 un poligon cu n_2 vârfuri; fie $n = n_1 + n_2$. Atunci $\mathcal{P}_1 \cup \mathcal{P}_2$, $\mathcal{P}_1 \cap \mathcal{P}_2$ și $\mathcal{P}_1 \setminus \mathcal{P}_2$ pot fi determinate în timp $O(n \log n + k \log n)$, unde k este complexitatea output-ului.

Algoritmi avansați

C13 - Elemente de programare liniară

Mihai-Sorin Stupariu

Sem. al II-lea, 2024-2025

Motivație: turnarea pieselor în mătrițe

Intersecții de semiplane - abordare cantitativă

Dualitate

Intersecții de semiplane - abordare calitativă. Programare liniară

Turnarea pieselor în matrițe



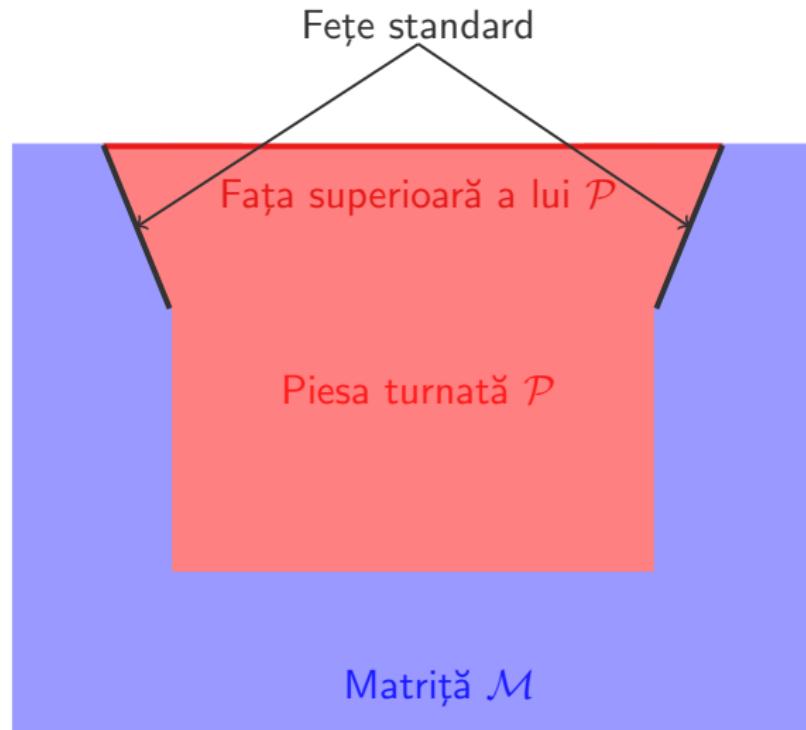
Turnarea pieselor în matrițe



Turnarea pieselor în matrițe

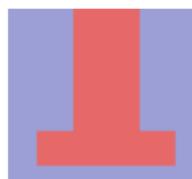


Turnarea pieselor în matrițe

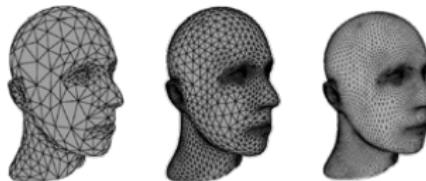


Problematizare

- ▶ Turnarea pieselor în matrițe și extragerea lor fără distrugerea matriței.
- ▶ Neajunsuri: unele obiecte pot rămâne blocați; există obiecte pentru care nu există o matriță adecvată.



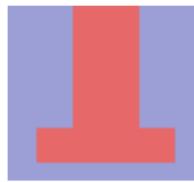
- ▶ **Problema studiată.** Dat un obiect, există o matriță din care să poată fi extras (și dacă da, cu un algoritm eficient?)



Sursa: <https://www.graphics.rwth-aachen.de/publication/03149/>

Convenții

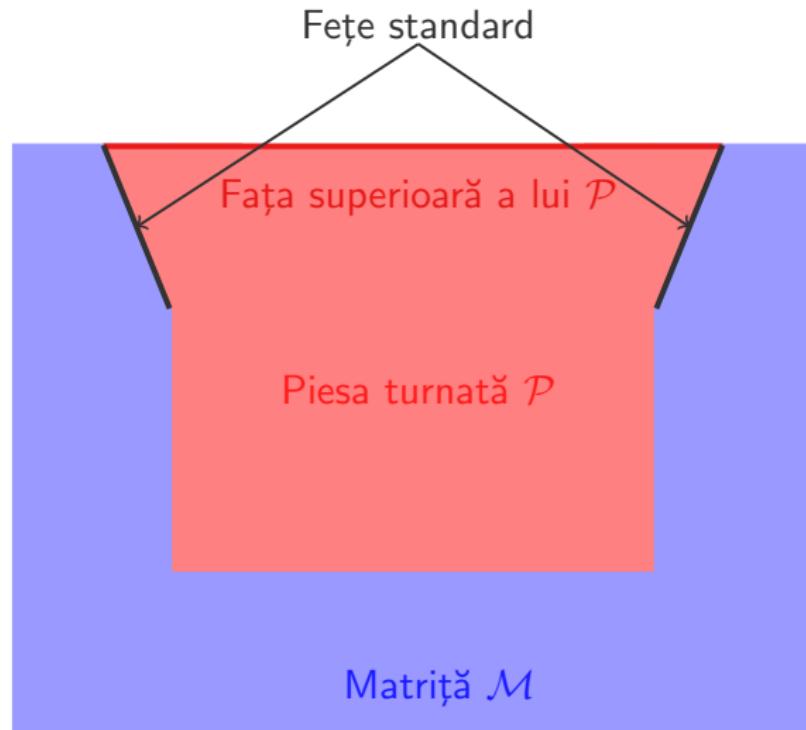
- ▶ Obiectele: **poliedrale**. Matrițele: formate dintr-o singură piesă; fiecărui obiect \mathcal{P} îi este asociată o matrice $\mathcal{M}_{\mathcal{P}}$
- ▶ Obiectul: extras printr-o singură translație (sau o succesiune de translații)
- ▶ **Alegerea orientării:** diverse orientări ale obiectului pot genera diverse matrițe, astfel încât doar în unele configurații este posibilă extragerea obiectului



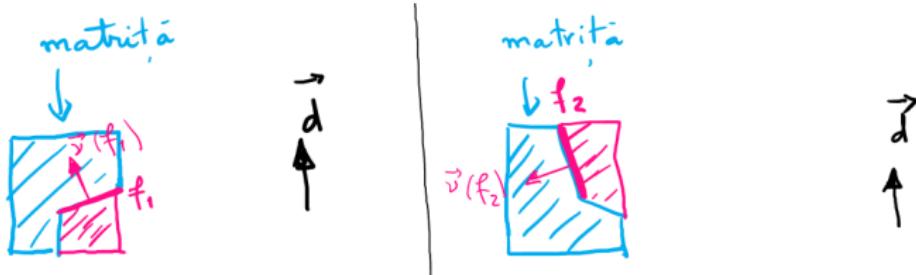
Terminologie și convenții

- ▶ **Fața superioară:** prin convenție, obiectele au (cel puțin) o față superioară (este orizontală, este singura care nu este adjacente cu matrița). Celelalte fețe: **standard**; orice față standard f a obiectului corespunde unei fețe standard \hat{f} a matriței.
- ▶ **Obiect care poate fi turnat (castable):** există o orientare pentru care acesta poate fi turnat și apoi extras printr-o translație (succesiune de translații): *direcție admisibilă*.
- ▶ **Convenții:** Matrița este paralelipipedică și are o cavitate corespunzătoare obiectului; fața superioară a obiectului (și a matriței) este perpendiculară cu planul Oxy .

Turnarea pieselor în matrițe



Descrierea proprietății de a putea extrage o piesă într-o direcție dată



În figura din stânga fața \hat{f}_1 a mătriței blochează extragerea în direcția \vec{d} . Acest fapt este echivalent cu

$$m(\angle(\vec{\nu}(f_1), \vec{d})) < 90^\circ \Leftrightarrow \cos(\angle(\vec{\nu}(f_1), \vec{d})) > 0.$$

În figura din dreapta fața \hat{f}_2 a mătriței permite extragerea în direcția \vec{d} . Acest fapt este echivalent cu

$$m(\angle(\vec{\nu}(f_2), \vec{d})) \geq 90^\circ \Leftrightarrow \cos(\angle(\vec{\nu}(f_2), \vec{d})) \leq 0.$$

Am notat cu $\vec{\nu}(f_1)$, $\vec{\nu}(f_2)$ normalele exterioare la fețele f_1 , respectiv f_2 .

Condițiile referitoare la unghiuri indicate mai sus trebuie verificate pentru **toate** fețele!

Detaliere (scriere în coordonate)

- ▶ Cum vrem să extragem obiectul din mătriță “în sus”, putem presupune f.r.g. că $\vec{d} = (d_x, d_y, 1)$ (de ce?).
 - ▶ Fie f o față a obiectului, $\vec{\nu}(f) = (\nu_x, \nu_y, \nu_z)$. Faptul că față corespunzătoare \hat{f} a mătriței **nu** blochează extragerea în direcția \vec{d} revine la
- $$\langle \vec{\nu}(f), \vec{d} \rangle \leq 0 \Leftrightarrow$$
- $$\nu_x \cdot d_x + \nu_y \cdot d_y + \nu_z \leq 0. \quad (1)$$
- ▶ Fixată o față f (informația relevantă fiind ν_x, ν_y, ν_z) căutăm $\vec{d} = (d_x, d_y)$ astfel încât să fie verificată relația (1). Aceasta este o inegalitate care descrie un hiperplan.
 - ▶ Condițiile indicate mai sus trebuie verificate pentru **toate** fețele!

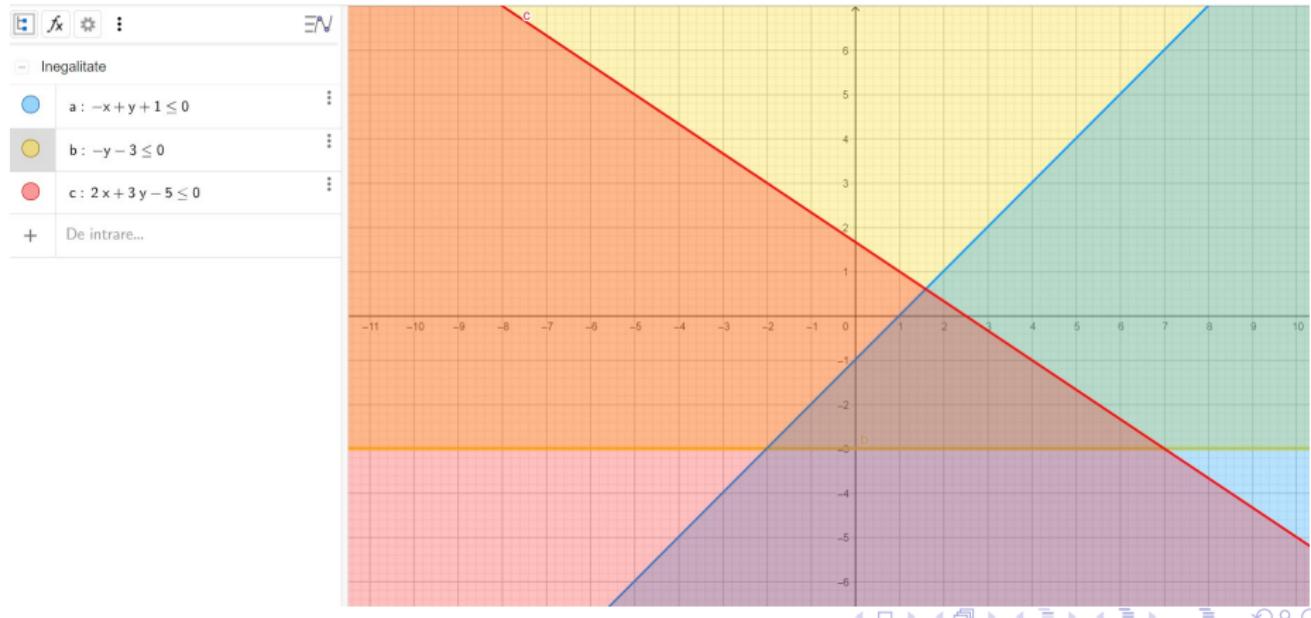
Sinteză - fundamente geometrice

- ▶ **Condiție necesară:** direcția de extragere \vec{d} trebuie să aibă componenta z pozitivă
- ▶ **În general:** o față standard \hat{f} a matriței (corespunzătoare unei fețe f a piesei) pentru care unghiul dintre normala exteroară $\vec{n}(f)$ la față f și \vec{d} este mai mic de 90° împiedică translația în direcția \vec{d}
- ▶ **Propoziție.** *Un poliedru \mathcal{P} poate fi extras din matrița sa $M_{\mathcal{P}}$ prin translație în direcția \vec{d} dacă și numai dacă \vec{d} face un unghi de cel puțin 90° cu normala exteroară a fiecărei fețe standard a lui \mathcal{P} .*
- ▶ **Reformulare.** Dat \mathcal{P} , trebuie găsită o direcție \vec{d} astfel încât, pentru fiecare față standard f , unghiul dintre \vec{d} și $\vec{n}(f)$ să fie cel puțin 90° .
- ▶ **Analitic - pentru o față:** fiecare față definește un semiplan, i.e. dată o față standard f a poliedrului / matriței, a găsi o direcție admisibilă revine la a rezolva o inecuație de tipul (1), care corespunde unui semiplan.
- ▶ **Analitic - toate fețele:** Fie \mathcal{P} un poliedru; față superioară fixată, paralelă cu planul Oxy . Considerăm matrița asociată și toate fețele matriței (i.e. toate fețele standard ale poliedrului). A determina o direcție admisibilă revine la a determina o direcție care verifică toate inegalitățile de tip (1), deci un sistem de inecuații.
- ▶ **Concluzie:** Pentru a stabili dacă există o direcție admisibilă, trebuie stabilit dacă o intersecție de semiplane este nevidă.

Exemple

1. Intersecția semiplanelor

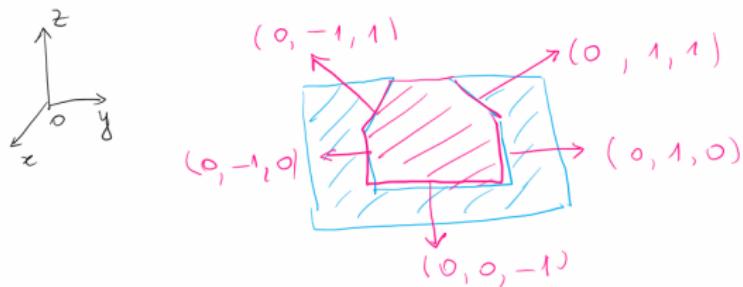
$$-x + y + 1 \leq 0; \quad -y - 3 \leq 0; \quad 2x + 3y - 5 \leq 0.$$



Exemple

2 (a). Normalele exterioare ale fețelor standard, parcuse în sens orar, sunt coliniare cu vectorii

$$(0, 1, 1), (0, 1, 0), (0, 0, -1), (0, -1, 0), (0, -1, 1).$$



$$(0, -1, 1) \rightsquigarrow 0 \cdot x + (-1) \cdot y + 1 \leq 0$$

$$(0, 1, 1) \rightsquigarrow 0 \cdot x + 1 \cdot y + 1 \leq 0$$

$$(0, 1, 0) \rightsquigarrow 0 \cdot x + 1 \cdot y + 0 \leq 0$$

$$(0, 0, -1) \rightsquigarrow 0 \cdot x + 0 \cdot y + (-1) \leq 0$$

$$(0, -1, 0) \rightsquigarrow 0 \cdot x + (-1) \cdot y + 0 \leq 0$$

sistem incompatibil,
obiectul nu poate
fi extras

$$y \geq 1$$

$$y \leq -1$$

$$y \leq 0$$

$$-1 \leq 0$$

$$y \geq 0$$

Temă

2 (b). Normalele exterioare ale fețelor standard sunt coliniare cu vectorii

$$(0, 1, -1), (0, 1, 0), (0, 0, -1), (0, -1, 0), (0, -1, -1).$$

Intersecții de semiplane - probleme studiate, rezultate

► Probleme studiate:

- (i) **Caracterizare explicită:** Să se determine care sunt elementele (vârfuri, muchii, etc.) care determină o intersecție de semiplane.
- (ii) **Calitativ:** Să se stabilească dacă o intersecție de semiplane este nevidă.

► Rezultate: (descrise în detaliu ulterior)

- (i) *Intersecția unei mulțimi de n semiplane poate fi determinată cu complexitate-timp $O(n \log n)$ și folosind $O(n)$ memorie.*
- (ii) *Se poate stabili cu complexitate-timp medie $O(n)$ dacă o intersecție de semiplane este nevidă.*
- (ii)' *Fie \mathcal{P} un poliedru cu n fețe. Se poate decide dacă \mathcal{P} reprezintă un obiect care poate fi turnat cu complexitate-timp medie $O(n^2)$ și folosind $O(n)$ spațiu. În caz afirmativ, o matriță și o direcție admisibilă în care poate fi extras \mathcal{P} este determinată cu aceeași complexitate-timp.*

(i) Caracterizare explicită - Formularea problemei

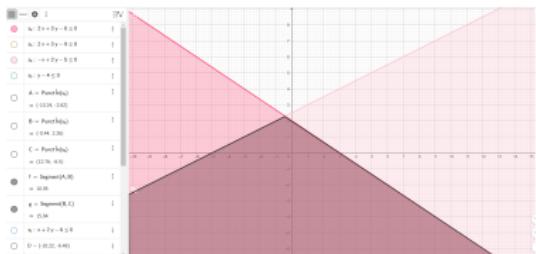
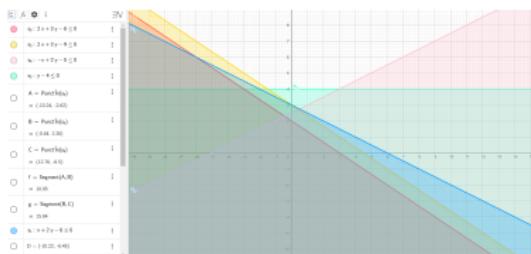
- Fie $\mathcal{H} = \{H_1, H_2, \dots, H_n\}$ o mulțime de semiplane din \mathbb{R}^2 ; semiplanul H_i dat de o relație de forma

$$a_i x + b_i y + c_i \leq 0$$

- Intersecția $H_1 \cap H_2 \cap \dots \cap H_n$ este dată de un sistem de inecuații; este o mulțime poligonală convexă, mărginită de cel mult n muchii (poate fi vidă, mărginită, nemărginită,...). Se poate aplica un algoritm similar algoritmului de suprapunere a straturilor tematice (cf. curs 12) pentru a determina această intersecție.
- De clarificat: date n semiplane, care sunt cele care contribuie **efectiv** la determinarea intersecției acestora? (v. slide-ul următor)

Semiplane - intersecții

Când determinăm o intersecție de semiplane, nu sunt neapărat relevante toate semiplanele. În figura de mai jos sunt considerate cinci semiplane s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 dintre care relevante pentru intersecție sunt doar s_2 și s_4 .



Dualitate – motivație intuitivă

- ▶ De câte informații (numerice) este nevoie pentru a indica **un punct în plan?**
- ▶ 2
- ▶ De câte informații (numerice) este nevoie pentru a indica **o dreaptă neverticală în plan?**
- ▶ 2
- ▶ Există o modalitate naturală de a stabili o corespondență între puncte și drepte?
- ▶ **DA: dualitate**
- ▶ Cum se reflectă / respectă diferite proprietăți geometrice (de exemplu incidența) prin dualitate?

Dualitate – definiții

- ▶ Unui punct $p = (p_x, p_y)$ din planul \mathbb{R}^2 (plan primal) i se asociază o dreaptă din planul dual, notată p^* :

$$p^* : (y = p_x x - p_y) \text{ duala lui } p.$$

- ▶ Unei drepte neverticale $d : (y = m_d x + n_d)$ din planul primal i se asociază un punct din planul dual, notat d^* :

$$d^* = (m_d, -n_d) \text{ dualul lui } d.$$

- ▶ **Obs.** Această transformare este polaritatea față de parabola $y = \frac{x^2}{2}$.

Dualitate – proprietăți elementare

1) Păstrează incidenta

$$p \in d \Leftrightarrow d^* \in p^*$$

Exemplu

Pl. primal

$$d : (y = 2x + 1)$$

$$p = (1, 3)$$

Pl. dual

$$d^* = (2, -1)$$

$$p^* : (y = \infty - 3)$$

Dualitate – proprietăți elementare

2) Păstrează "ordinea"

p este situat deasupra dreptei d (nereverticală) \Leftrightarrow
 d^* ——— ——— p^*

Exemplu

Pl. primal

$$P = (1, 1)$$

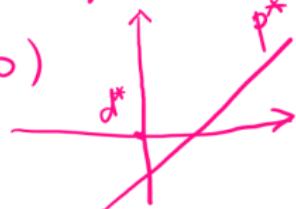
$$d: (y = 0)$$



Pl. dual

$$P^*: (y = x - 1)$$

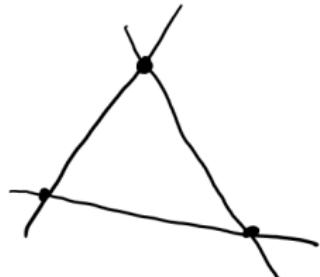
$$d^* = (0, 0)$$



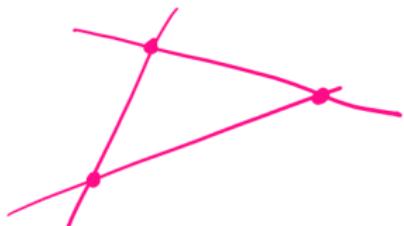
Dualitate – “dicționar” concepte și configurații

Plan primal	Plan dual
Punct p	Dreaptă neverticală p^*
Dreaptă neverticală d	Punct d^*
Dreaptă determinată de două puncte	Punct de intersecție a două drepte
Punctul p deasupra dreptei d	Punctul d^* deasupra dreptei p^*
Segment	Fascicul de drepte (<i>wedge</i>)

Exemplu

Configurație primală

3 puncte necoliniare
și dreptele determinate
de ele

Configurație duală

3 drepte care nu
trec prin același punct
și punctele determinate
de ele

Semiplane inferioare și semiplane superioare

- Exemple.



semiplan inferior



semiplan superior

- Dat un semiplan delimitat de o dreaptă neverticală

$$ax + by + c \leq 0$$

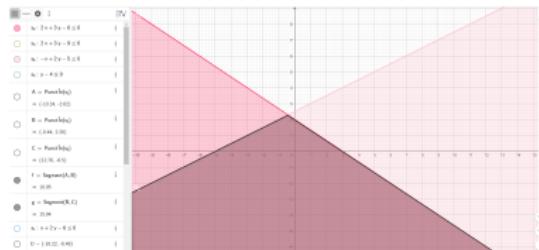
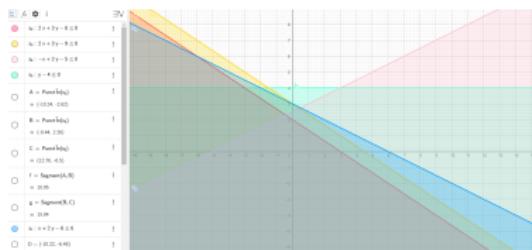
cum se decide dacă este semiplan inferior sau semiplan superior?
Exemple:

$$-x + y + 3 \leq 0 \quad \text{semiplan inferior}$$

$$x - y - 3 \leq 0 \quad \text{semiplan superior}$$

Semiplane inferioare și semiplane superioare

Când determinăm o intersecție de semiplane inferioare / superioare, nu sunt neapărat relevante toate semiplanele. În figura de mai jos sunt considerate cinci semiplane inferioare s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 dintre care relevante pentru intersecție sunt doar s_2 și s_4 .

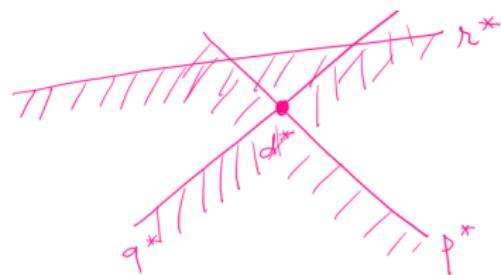


Observația fundamentală

Fie p, q cu $p \neq q$ și dreapta $d = pq$ neverticală. Fie r un punct situat dedesubtul dreptei $d = pq$. Care este configurația duală?



planul primal:
 r este dedesubtul dreptei $pq = d$



planul dual:
 d^* este dedesubtul dreptei r^*

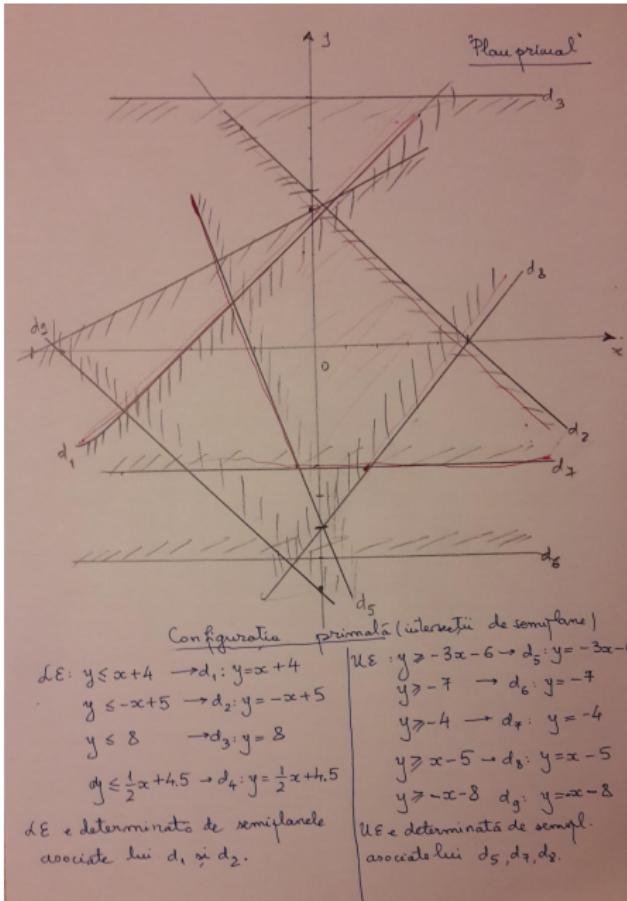
Observația fundamentală

- ▶ Fie \mathcal{P} o mulțime de puncte.
- ▶ **Q:** Ce înseamnă că un segment $[pq]$ ($p, q \in \mathcal{P}$) participă la frontieră superioară a acoperirii convexe a lui \mathcal{P} ?
- ▶ **A:** Toate celelalte puncte sunt dedesubtul dreptei $d = pq$.
- ▶ Configurația duală: Punctul d^* este situat dedesubtul dreptelor corespunzătoare celorlalte puncte și, prin trecere la semiplane inferioare, “conțează” semiplanele inferioare determinate de p^* și q^* .

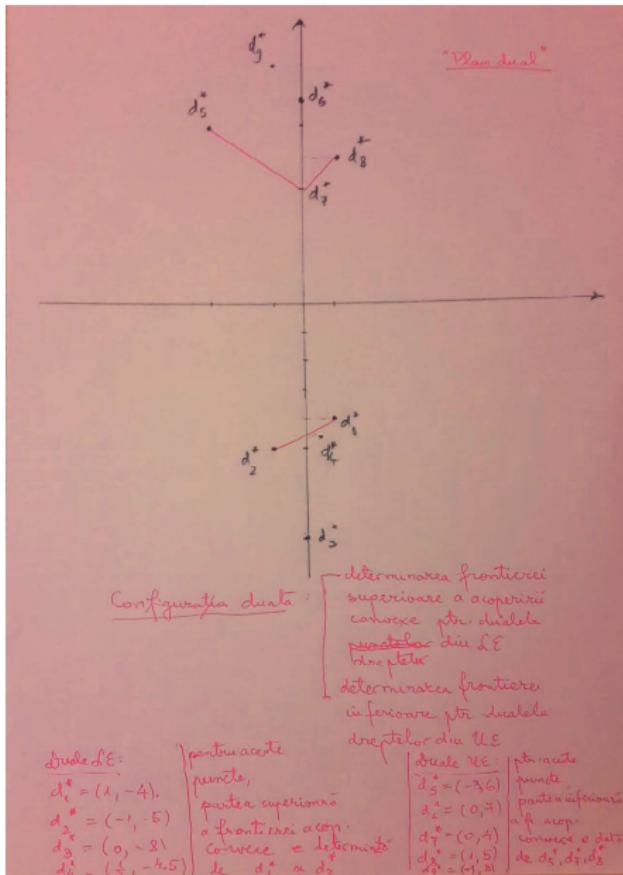
Concluzie pentru (i) - abordarea cantitativă

- ▶ Pentru a determina o intersecție de **semiplane inferioare** se consideră mulțimea de puncte din planul dual și se determină **frontiera superioară** a acoperirii convexe a mulțimii respective. Un rezultat analog are loc pentru intersecții de **semiplane superioare** și **frontiera inferioară** a acoperirii convexe a mulțimii de puncte duale. În consecință:
 - ▶ **Teoremă** *Intersecția a n semiplane poate fi descrisă cu un algoritm de complexitate $O(n \log n)$.*
 - ▶ De fapt, aplicarea dualității combinată cu sortarea lexicografică poate fi interpretată ca fiind ordonare a dreptelor după panta dreptei suport și apoi utilizarea unui mecanism incremental, cu eliminarea semiplanelor redundante. Această abordare directă este descrisă de [Z. Zhu](#) în 2006, în *New Algorithm for Half-plane Intersection and its Practical Value* (v. și [această referință](#)).

Exemplu



Exemplu



(ii) Abordarea calitativă. Motivație

- Sunt realizate 3 produse (noteate 1, 2 și 3) pe 2 aparete (noteate X și Y).
- Ciclul de producție este săptămânal (40h de lucru). Timpul de producție (în minute) pentru produs este indicat în tabel.

	X	Y	Obs.	Nr. prod.	Spațiu	Profit
1	10	27	pe ambele	x_1	$0.1m^2$	10
2	12	19	în paralel, simultan	x_2 , respectiv y_2	$0.2m^2$	13
3	8	24	în paralel, simultan	x_3 , respectiv y_3	$0.05m^2$	9

- Aparatele X și Y au un interval de menenanță de 5%, respectiv 7% din timpul de lucru. Spațiul total de depozitare este de $50m^2$.
- Modelul matematic:

Constrângeri:

$$\begin{array}{ll} 0.1x_1 + 0.2(x_2 + y_2) + 0.05(x_3 + y_3) \leq 50 & \text{Spațiu de depozitare} \\ 10x_1 + 12x_2 + 8x_3 \leq 0.95 \cdot 40 \cdot 60 & \text{Timp aparatul } X \\ 27x_1 + 19y_2 + 24y_3 \leq 0.93 \cdot 40 \cdot 60 & \text{Timp aparatul } Y \end{array}$$

Cerință:

$$\text{maximizează}(10x_1 + 13(x_2 + y_2) + 9(x_3 + y_3))$$

Problematizare, terminologie

- Formulare generală (în spațiul d -dimensional):

$$\text{maximizează } (c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_dx_d)$$

date constrângerile liniare (inegalități)

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1d}x_d \leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2d}x_d \leq b_2 \\ \dots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nd}x_d \leq b_n \end{array} \right. \quad (2)$$

- Denumiri:

- date de intrare: $(a_{ij})_{i=\overline{1,n}, j=\overline{1,d}}$, $(b_i)_{i=\overline{1,n}}$, $(c_j)_{j=\overline{1,d}}$
- funcție obiectiv: $(c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_dx_d)$
- constrângerile: inegalitățile (2)
- regiune realizabilă (fezabilă): intersecția semispațiilor care definesc constrângerile problemei

- Obs. Interpretare a cerinței de maximizare: Maximizarea funcției obiectiv revine la a determina un punct al cărui vector de poziție are proiecția maximă de direcția dată de vectorul $\vec{c} = (c_1, c_2, \dots, c_d)$.

Exemplu - cazul 1D ($d = 1$)

Coordonata x :

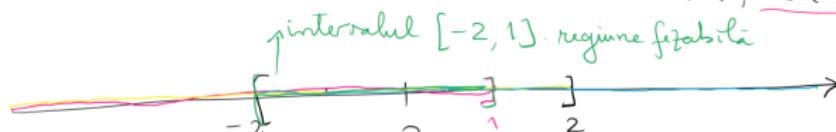
$$\begin{cases} a_1x \leq b_1, \text{ interval} \\ a_2x \leq b_2 \\ \vdots \\ a_nx \leq b_n \end{cases}$$

funcție obiectiv
constraintări

maximizează (cx)

Exemplu corect : maximizează ($2x$)

$$\begin{cases} 3x \leq 6 \\ -2x \leq 4 \\ 6x \leq 6 \end{cases} \quad \begin{array}{l} x \leq 2, \quad x \in (-\infty, 2] \\ x \geq -2, \quad x \in [-2, \infty) \\ x \leq 1, \quad x \in (-\infty, 1] \end{array}$$



Maximul funcției obiectiv este egal cu 2 și se obține pîr $x = 1$.

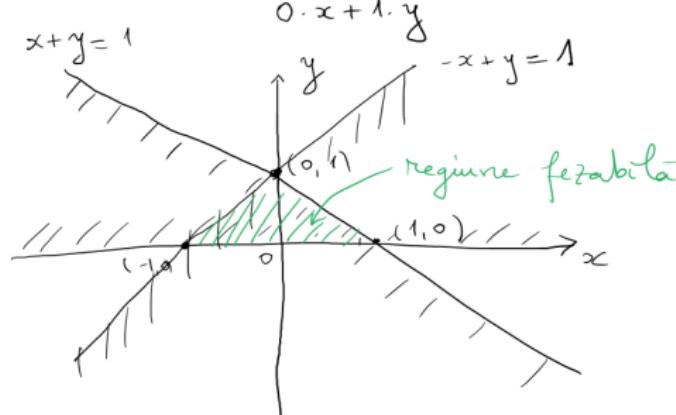
Lemă. (Pentru $d = 1$) Un program liniar 1-dimensional poate fi rezolvat în timp liniar.

Exemplu - cazul 2D ($d = 2$)

Notăm coordonatele cu x și y .

maximizarea (y) , $\vec{c} = (0, 1)$, date

$$\begin{cases} x + y \leq 1 \\ -y \leq 0 \\ -x + y \leq 1 \end{cases}$$



Funcția are valoarea maximă 1, atinsă în punctul $(0, 1)$.

Probleme de programare liniară în plan ($d = 2$)

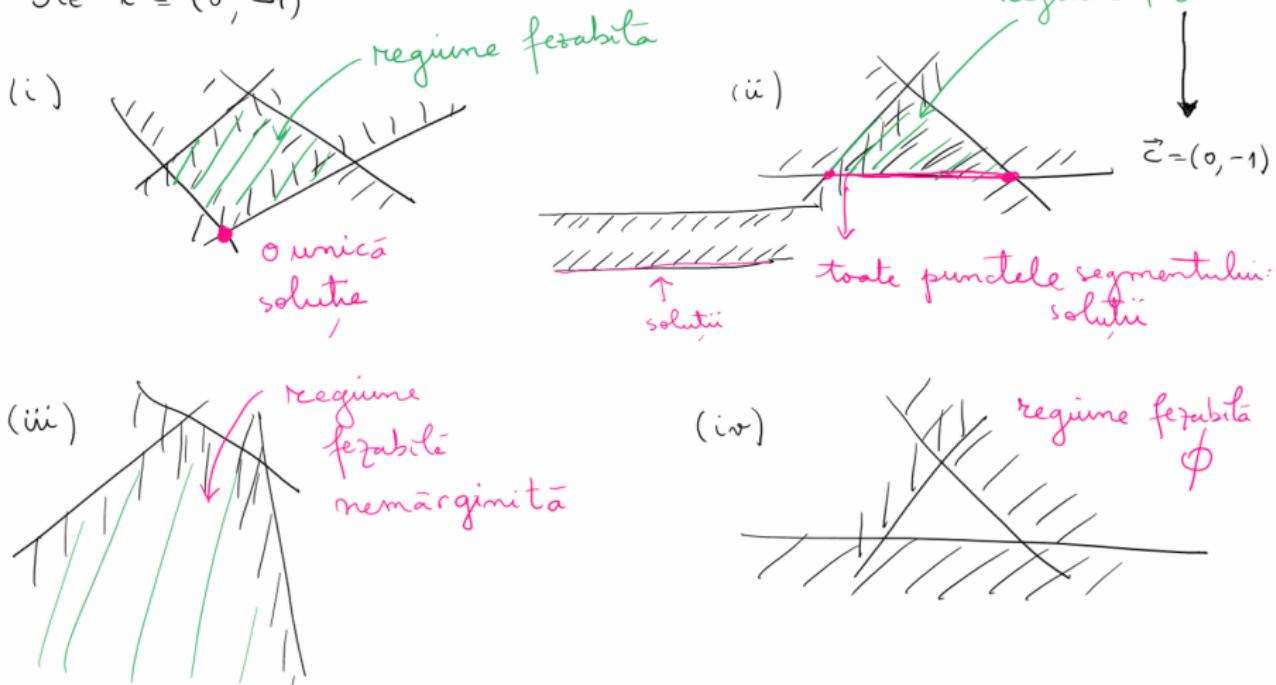
► Convenții și terminologie:

- Coordonatele: x și y
 - Funcția obiectiv: $f_{\vec{c}}(p) = c_x x + c_y y$, unde $\vec{c} = (c_x, c_y)$.
 - Constrângerile: h_1, h_2, \dots, h_n (semiplane); se notează
 $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$
 - Regiunea fezabilă este $C = h_1 \cap h_2 \cap \dots \cap h_n$.
- **Program liniar:** (H, \vec{c}) .
- **Scop:** Se caută $p \in C$ astfel ca $f_{\vec{c}}(p)$ să fie maximă.

- Pentru o problemă de programare liniară în plan pot fi distinse patru situații: (i) o soluție unică; (ii) toate punctele de pe o muchie sunt soluții; (iii) regiunea fezabilă este nemărginită și pot fi găsite soluții de-a lungul unei semidrepte; (iv) regiunea fezabilă este vidă.

Cazul 2D ($d = 2$) - exemple de regiuni fezabile

Fie $\vec{e} = (0, -1)$

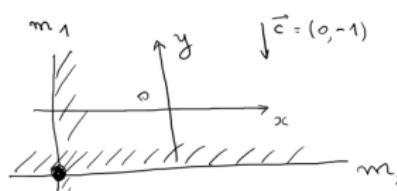


Algoritm incremental pentru rezolvarea unei probleme de programare liniară 2D

► Principii:

- ▶ constrângerile sunt adăugate una câte una;
 - ▶ presupunem că la fiecare pas soluția (punctul de maxim) există, apoi actualizează;
 - ▶ sunt adăugate la început constrângerile care garantează mărginirea programului liniar, definite astfel: se alege $M >> 0$ și se definesc noi constrângerile convenabile;
 - ▶ se lucrează cu convenția de ordonare lexicografică, astfel încât există o **unică** soluție optimă.
- Vom considera în continuare $\vec{c} = (0, -1)$, iar noile constrângerile vor fi:

$$m_1 : x \geq -M, \quad m_2 : y \geq -M.$$



Notării

- Fie (H, \vec{c}) un program liniar cu constrângерile h_1, h_2, \dots, h_n . Se notează:

$H_i = \{m_1, m_2, h_1, h_2, \dots, h_i\}$, multime de semiplane

$C_i = m_1 \cap m_2 \cap h_1 \cap h_2 \cap \dots \cap h_i$, regiune fezabilă.

Notăția este pentru $i = 0, \dots, n$, în particular

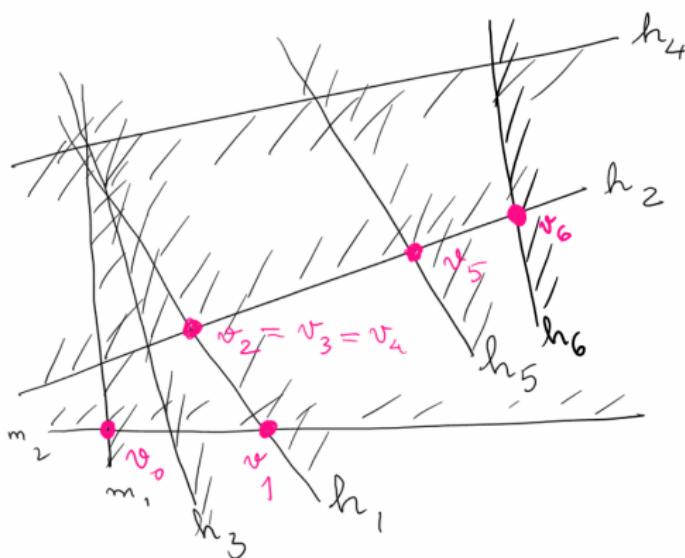
$$H_0 = \{m_1, m_2\} \quad C_0 = m_1 \cap m_2.$$

- Observații:

(i) $C_0 \supseteq C_1 \supseteq C_2 \supseteq \dots \supseteq C_n = C$.

(ii) Pentru fiecare i , regiunea fezabilă C_i , dacă este nevidă, are un vîrf care reprezintă o soluție optimă a problemei (H_i, \vec{c}) . Punctul este notat cu v_i (depinde de alegerea lui m_1 și m_2).

Exemplu



$$\vec{C} = (0, -1)$$

$$v_3 = v_2, \text{ pt.ca } v_2 \in h_3$$

$$v_4 = v_3 = v_2 \text{ pt.ca } v_3 \in h_4$$

$$v_5 \neq v_4 \text{ pt.ca } v_4 \notin h_5$$

Observații

- Fie $1 \leq i \leq n$, presupunem că C_{i-1} și v_{i-1} sunt determinate. Considerăm h_i . Sunt două situații:

- (i) dacă $v_{i-1} \in h_i$, atunci $v_i = v_{i-1}$,
- (ii) dacă $v_{i-1} \notin h_i$, atunci

fie $C_i = \emptyset$

fie $v_i \in d_i$, unde d_i este dreapta care mărginește h_i .

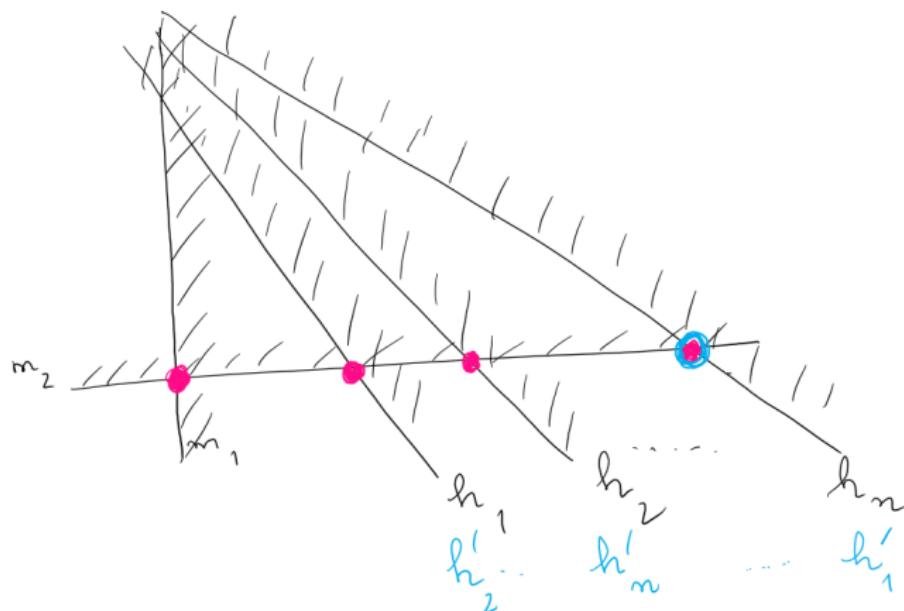
În acest caz, găsirea lui v_i revine la găsirea lui $p \in d_i$ care maximizează $f_c(p)$, date constrângerile deja existente ($p \in h, \forall h \in H_i$). **De fapt, aceasta este o problemă pe programare liniară 1-dimensională, care are complexitatea-timp liniară, adică $O(i)$.**

Algoritm LPMARG2D (H, \vec{c}, m_1, m_2)

- ▶ **Input.** Un program liniar $(H \cup \{m_1, m_2\}, \vec{c})$ din \mathbb{R}^2
- ▶ **Output.** Dacă $(H \cup \{m_1, m_2\}, \vec{c})$ nu e realizabil (fezabil), raportează. În caz contrar, indică punctul cel mai mic lexicografic p care maximizează $f_{\vec{c}}(p)$.

1. $v_0 \leftarrow$ "colțul" lui c_0
2. fie h_1, h_2, \dots, h_n semiplanele din H
3. **for** $i \leftarrow 1$ **to** n
4. **do if** $v_{i-1} \in h_i$
5. **then** $v_i \leftarrow v_{i-1}$
6. **else** $v_i \leftarrow$ punctul p de pe d_i care
 maximizează $f_{\vec{c}}(p)$ date constrângerile din H_i
7. **if** p nu există
8. **then** raportează "nefezabil" **end**
9. **return** v_n

Comentariu - ordinea contează



Algoritm aleatoriu

- ▶ Pasul 2. este înlocuit cu:
2'. Calculează o permutare arbitrară a semiplanelor, folosind o procedură adecvată.
- ▶ Algoritmul incremental LPMARG2D are complexitate-timp $O(n^2)$, iar varianta bazată pe alegerea aleatorie a semiplanelor are complexitate-timp medie $O(n)$ (n este numărul semiplanelor).

Analiza complexității-timp - varianta algoritmului probabilist (I)

Fie $(X_i)_{i=1,\dots,n}$ variabilă aleatoare definită astfel:

$$X_i = \begin{cases} 0, & \text{dacă } v_{i-1} \in h_i \text{ (adică este ales pasul 5 la iteratăia } i) \\ 1, & \text{dacă } v_{i-1} \notin h_i \text{ (adică este ales pasul 6 la iteratăia } i). \end{cases}$$

În concluzie, timpul total de rulare este $\sum_{i=1}^n X_i O(i) + O(n)$.

Valoarea așteptată (timpul mediu)

$$E\left[\sum_{i=1}^n X_i O(i)\right] = \mu\left(\sum_{i=1}^n X_i O(i)\right) = \sum_{i=1}^n O(i) \mu(X_i) \leq \sum_{i=1}^n O(i) \cdot \frac{2}{i} = O(n).$$

Vom arăta că $\mu(X_i) \leq \frac{2}{i}$, de unde va rezulta inegalitatea dorită.

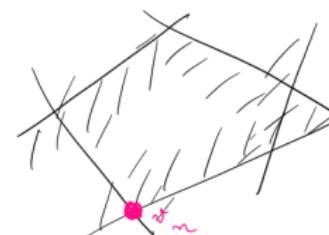
Analiza complexității-timp - varianta algoritmului probabilist (II)

- ▶ Demonstrăm că $\mu(X_i) \leq \frac{2}{i}$, pentru orice $i = 1, \dots, n$, adică probabilitatea ca $v_{i-1} \notin h_i$ este $\leq \frac{2}{i}$.
 - ▶ Arătăm inegalitatea pentru $i = n$ (cazul general, analog). Presupunem algoritmul terminat, v_n vârful optim.
 - Care este probabilitatea ca $v_{n-1} \notin h_n$, adică la adăugarea lui h_n , vârful v_{n-1} să fie modificat în v_n ? \Leftrightarrow
 - Care este probabilitatea ca eliminând unul dintre semiplane să fie modificat vârful optim v_n ?

- mr. cauzzi possibile: m
- mr. cauzzi scrivere
modificare: 2

\Rightarrow probabilitatea de a modifica $\leq \frac{2}{n}$

analog ptr. i - q.e.d.



$$\downarrow \vec{c} = (0, -1)$$

Algoritmi avansați

C14 - Probleme de localizare

Mihai-Sorin Stupariu

Sem. al II-lea, 2024-2025

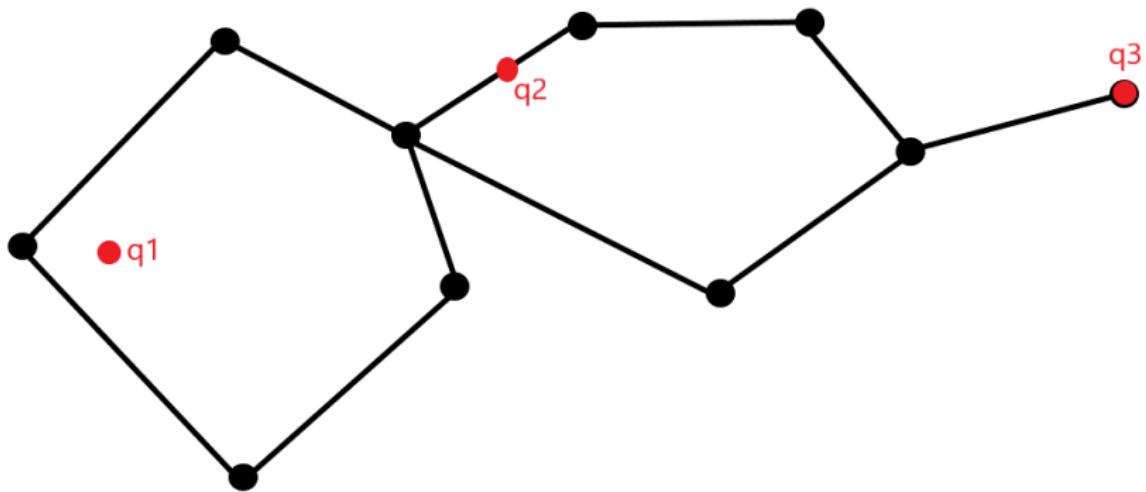
Localizarea punctelor – problematizare

- ▶ Căutare cu Google Maps
- ▶ *Interrogare pentru localizarea unui punct:* dată o hartă și un punct p , indicat prin cordonatele sale, să se determine regiunea hărții în care este situat p .
- ▶ *Harta:* subdiviziune planară, formată din vârfuri, (semi)muchii, fețe.
- ▶ Necessități: pre-procesare a informației; interogare rapidă.

Formalizare

- ▶ Fie \mathcal{S} o subdiviziune planară cu n muchii. *Problema localizării unui punct* revine la
 - ▶ a reține informațiile referitoare la \mathcal{S} pentru a putea răspunde la interogări de tipul:
 - ▶ dat un punct p , se raportează fața f care îl conține pe p ; în cazul în care p este situat pe un segment sau coincide cu un vârf, este precizat acest lucru.
- ▶ Lucrul cu coordonate: folosirea relației de ordine!

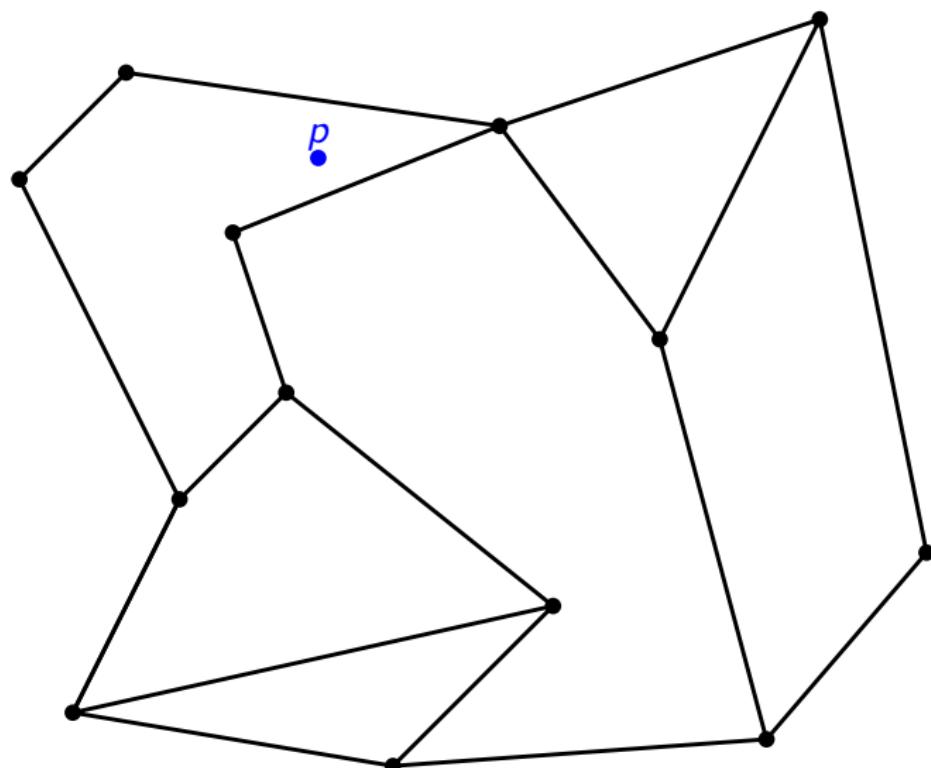
Intuiție



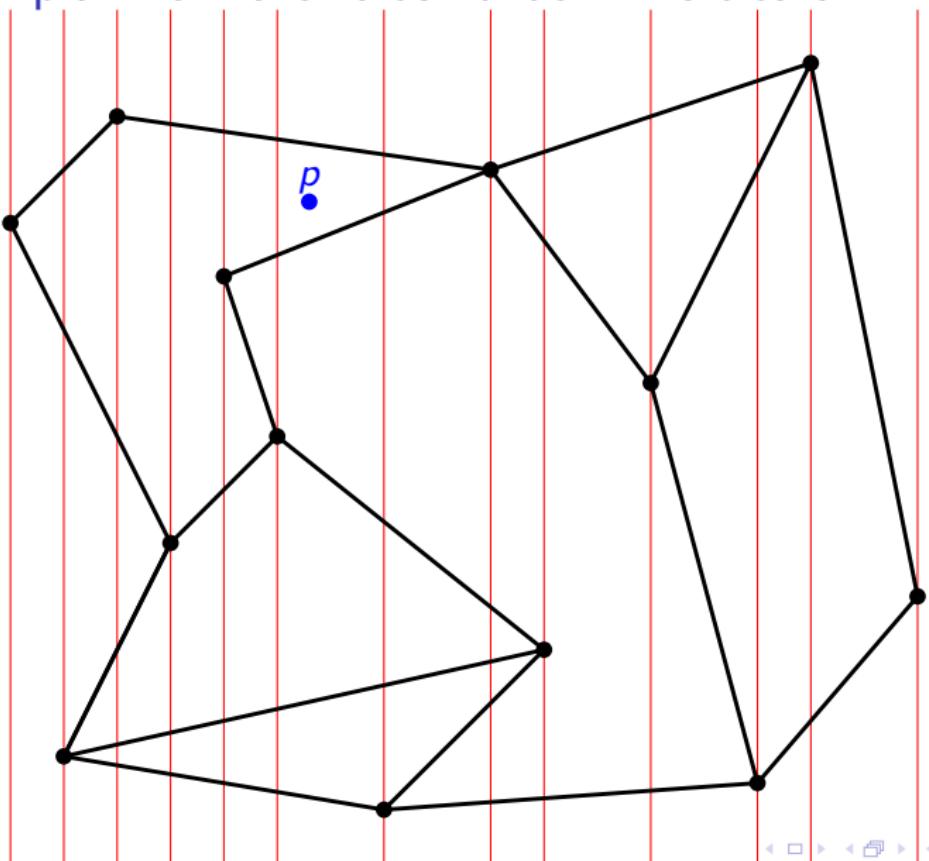
Intuiție - concluzie

- ▶ Subdivizare a planului în fâșii (benzi) verticale (cf. “*slabs*”)
 - ▶ **căutare după abscisă** - pentru identificarea fâșiei verticale (timp de căutare $O(\log n)$);
 - ▶ **căutare în cadrul unei fâșii** - pentru localizare în cadrul fâșiei verticale, realizată în raport cu segmente.

Exemplu

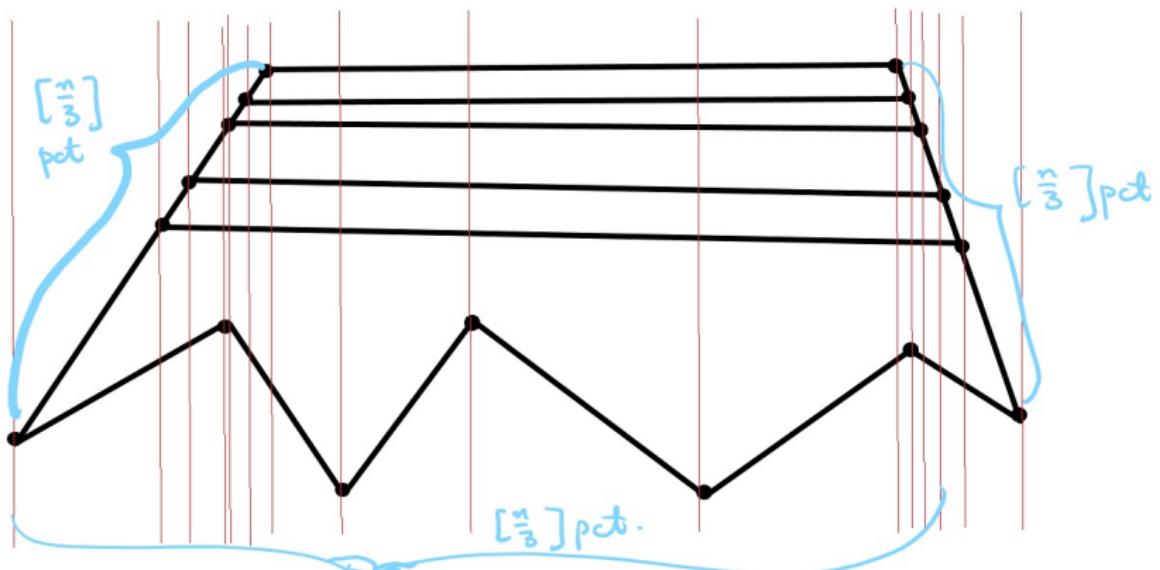


Exemplu - rafinare folosind benzi verticale

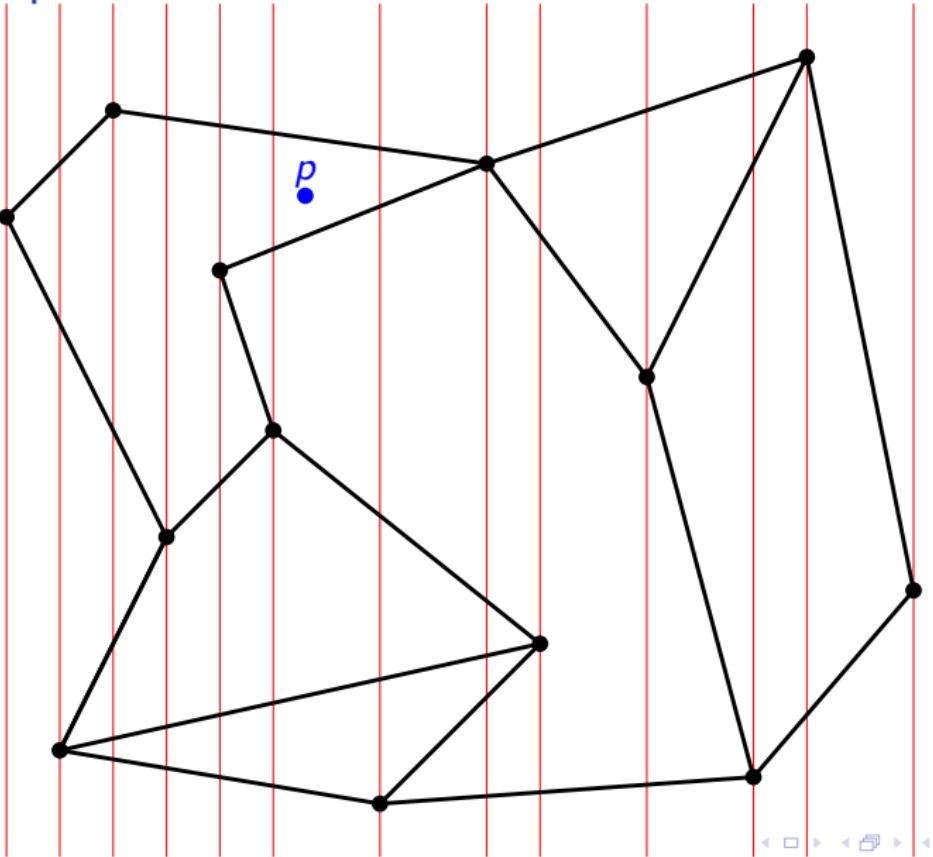


O astfel de rafinare nu este eficientă

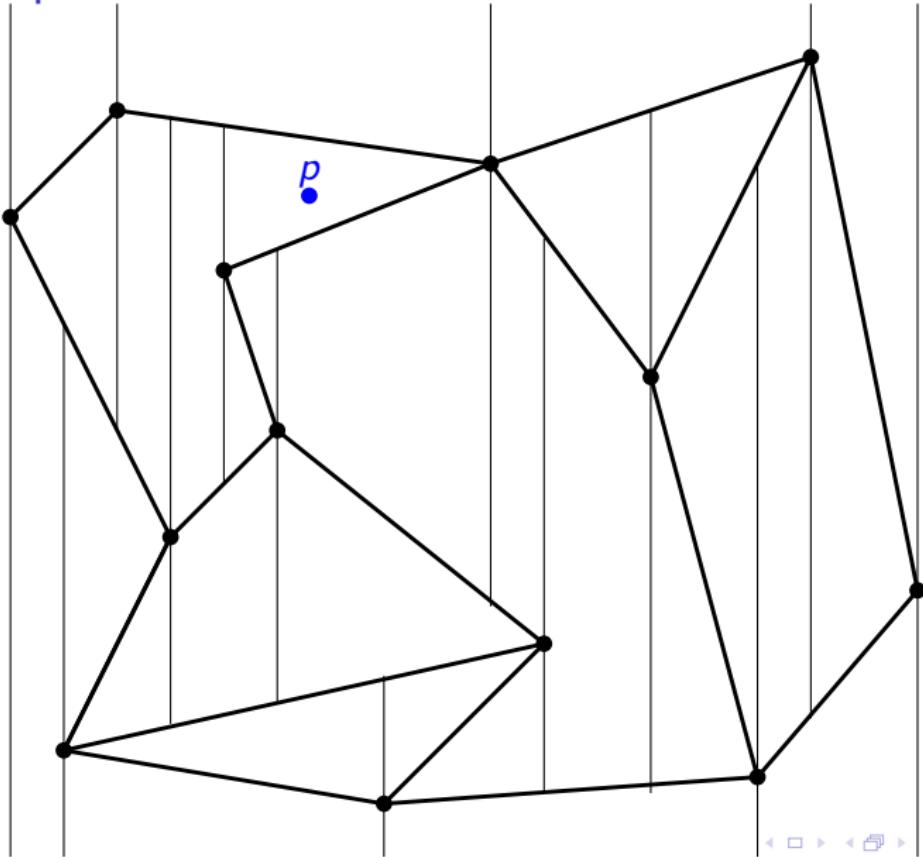
Memoria necesară poate fi uneori $O(n^2)$



Exemplu - rafinare folosind benzi verticale



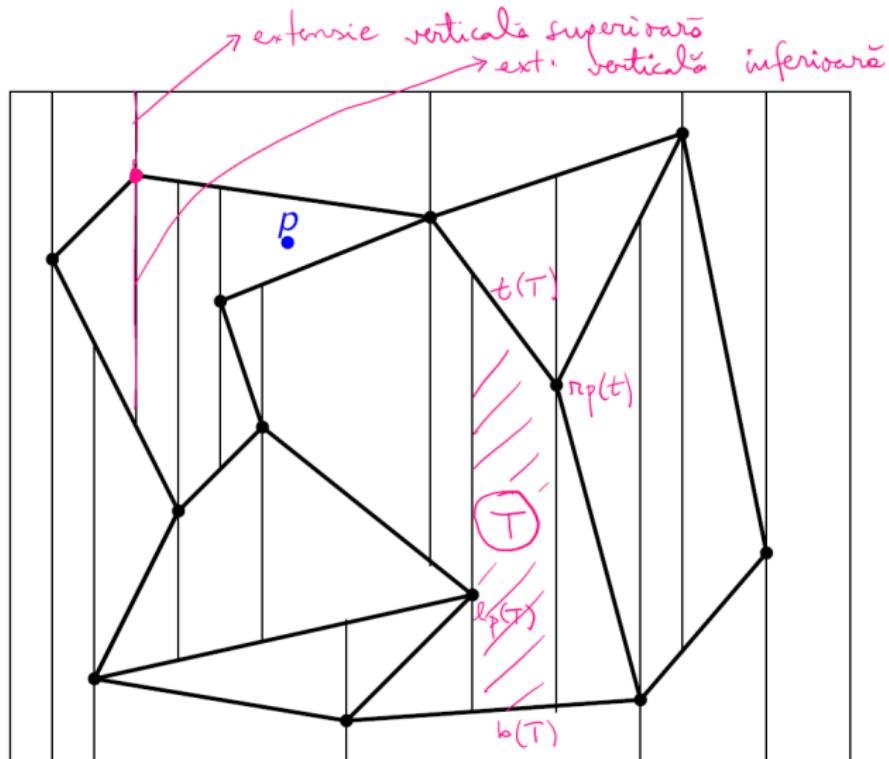
Exemplu - rafinare eficientă



Simplificări și ipoteze

- ▶ Se consideră o mulțime S de n segmente astfel ca oricare două dintre ele (i) fie nu au niciun punct comun; (ii) fie au un vârf comun.
- ▶ *Simplificare 1:* Se consideră un dreptunghi D cu laturile paralele cu axele de coordinate care include toată subdiviziunea inițială.
- ▶ *Simplificare 2:* Se presupune că nu există două vârfuri (extremități ale segmentelor din S) distincte care au aceeași coordonată x (în particular nu există segmente verticale).
- ▶ *Concluzie:* Se consideră o mulțime de n segmente S care verifică ipotezele de mai sus: *mulțime de segmente în poziție generală*. **Harta trapezoidală / descompunere verticală / descompunere cu trapeze** (*trapezoidal map*) $\mathcal{T}(S)$ a lui S este subdiviziunea indusă de S , dreptunghiul D și de extensiile verticale inferioare și superioare (concept introdus de Seidel, 1991).

Exemplu - hartă trapezoidală, extensii verticale



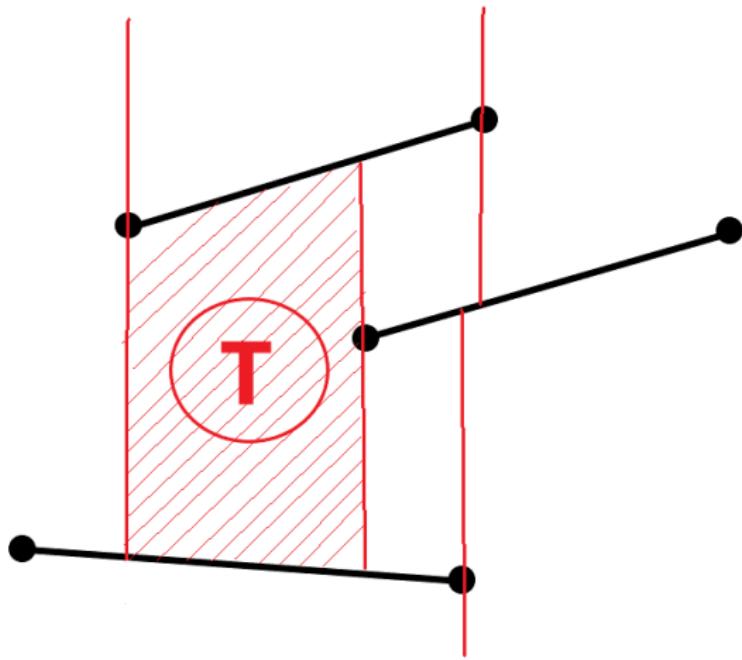
Hărți trapezoidale – probleme studiate

- ▶ Descrierea obiectelor geometrice din care sunt formate – ce informații se rețin?
- ▶ Aspecte legate de complexitate?
- ▶ Structuri de date adecvate?
- ▶ Un algoritm eficient?

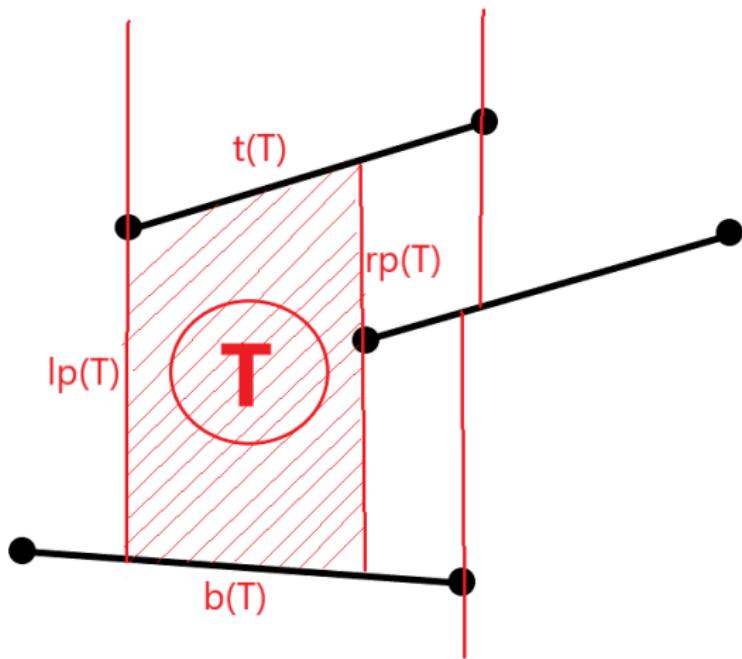
Descrierea obiectelor

- ▶ **Lema 1.** Fie S o mulțime de segmente în poziție generală. Fiecare față a unei hărți trapezoidale $\mathcal{T}(S)$ are una sau două margini verticale și exact două margini ne-verticale.
De fapt: fiecare față este un trapez, sau un dreptunghi sau un triunghi (ultimele putând fi privite drept cazuri particulare de trapeze).

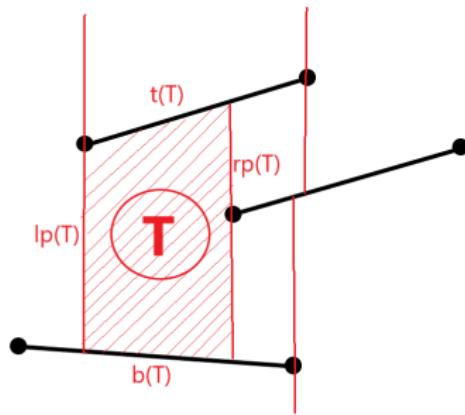
Informații geometrice sunt reținute pentru un trapez



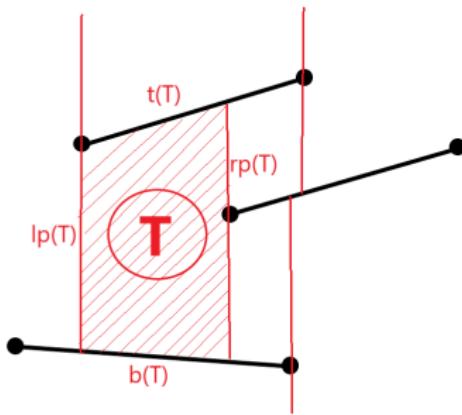
Informații geometrice sunt reținute pentru un trapez



Informații geometrice sunt reținute pentru un trapez

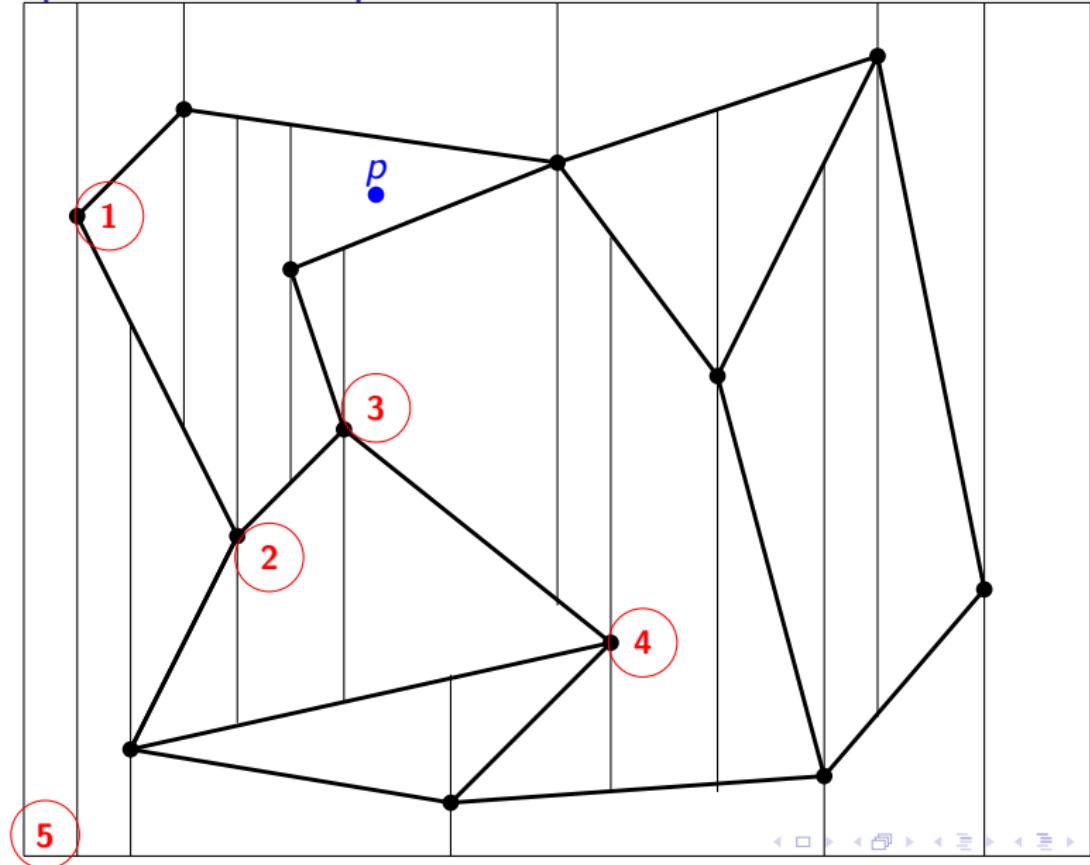


Informații geometrice sunt reținute pentru un trapez



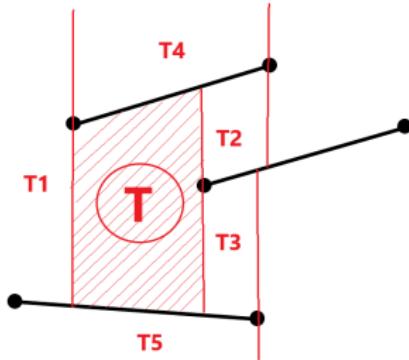
- ▶ $t(T)$, $b(T)$, $lp(T)$, $rp(T)$ determină în mod unic un trapez fixat T .
 $t(T)$, $b(T)$ sunt **segmente**, iar $lp(T)$, $rp(T)$ sunt **vârfuri** (extremități ale segmentelor)
- ▶ Există cinci cazuri posibile pentru marginea stângă lp (analog pentru marginea dreaptă rp).

Exemplu - hartă trapezoidală



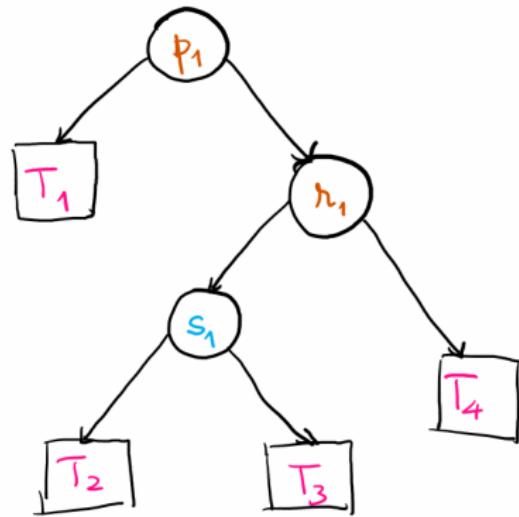
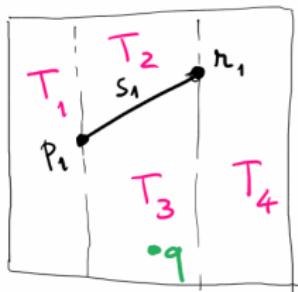
Complexitate și alte aspecte cantitative

- ▶ **Lema 2.** Fie S o mulțime de n segmente în poziție generală. Harta trapezoidală $\mathcal{T}(S)$ conține cel mult $6n + 4$ vârfuri și cel mult $3n + 1$ trapeze.
- ▶ **Lema 3.** Fie S o mulțime de n segmente în poziție generală. Fiecare trapez T este adiacent cu cel mult patru trapeze (cel mult un vecin stânga superior, cel mult un vecin stânga inferior, cel mult un vecin dreapta superior, cel mult un vecin dreapta inferior).



Trapezul T este adiacent cu T_1 , T_2 și T_3 , dar nu este adiacent cu T_4 și T_5 .

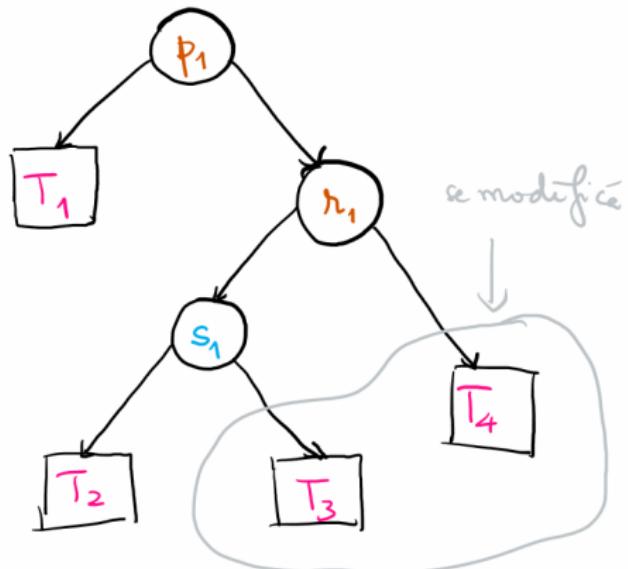
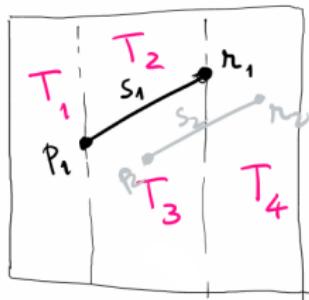
Exemplul 1 - structură de căutare asociată



Structura de căutare în cazul în care subdiviziunea planară este dată de un segment, s_1 .

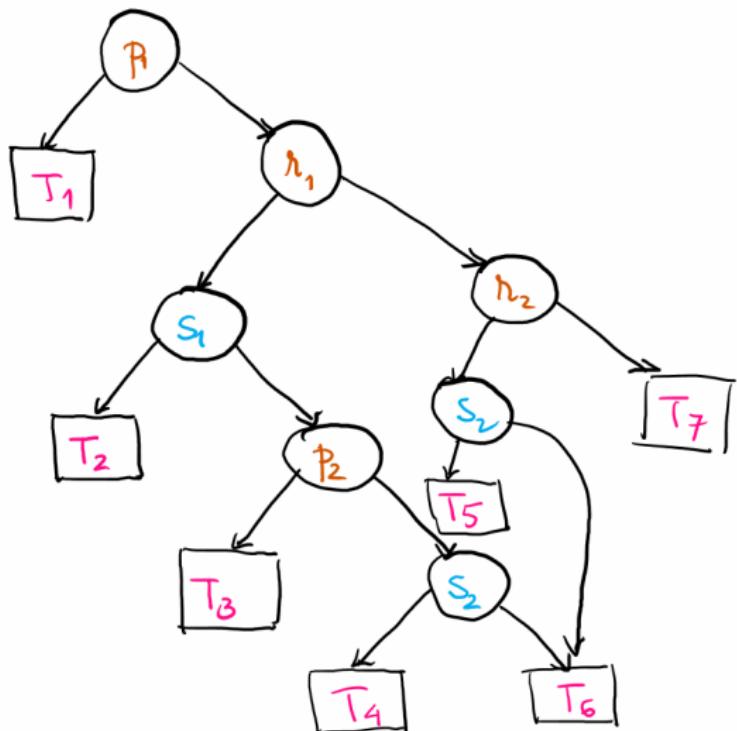
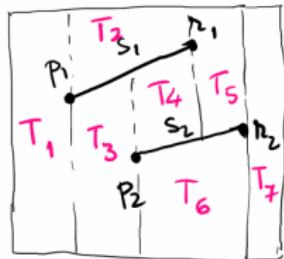
Folosind structura de căutare se poate stabili că punctul q este situat în trapezul T_3 .

Exemplul 1 - structură de căutare asociată



Structura de căutare în cazul în care subdiviziunea planară este dată de un segment, s_1 . Presupunem că mai adăgăm un segment, s_2 . Folosind structura de căutare se stabilește poziția extremităților segmentelor, urmând ca structura să fie actualizată prin înlocuirea trapezelor respective cu noduri/trapeze noi, în mod adecvat.

Exemplul 2 - structură de căutare asociată



Structura de căutare în cazul în care subdiviziunea planară este dată de două segmente, s_1 și s_2 .

Căutarea într-o hartă trapezoidală

x -nod (p)



q este la stg / dreapta
de vîrticele care trece
prin p
(comparații de abscise)

y -nod (s)



q este deasupra /
de dedesubtul lui s
(testul de orientare)

Structura de date

- ▶ Înregistrări pentru segmentele din S și vârfuri (extremitățile segmentelor).
- ▶ Înregistrări pentru trapeze: pointeri t , b , lp , rp și pointeri către cei (cel mult) patru vecini.
- ▶ **Structura de căutare:** \mathcal{D} este un graf orientat aciclic cu o singură rădăcină și exact o frunză pentru fiecare trapez din $\mathcal{T}(S)$.
- ▶ **Noduri și teste asociate:**
 - ▶ x-nod, etichetat cu o extremitate a unui segment; pentru un punct p testul asociat: *este punctul p situat la stânga sau la dreapta dreptei verticale care trece prin extremitatea memorată în acest nod?*
 - ▶ y-nod, etichetat cu un segment; pentru un punct p testul asociat: *este punctul p situat deasupra sau dedesubtul segmentului memorat în acest nod?*

Algoritm HARTA TRAPEZOIDALA

- ▶ **Input.** O mulțime S de n segmente în poziție generală.
 - ▶ **Output.** Harta trapezoidală $\mathcal{T}(S)$ și o structură de căutare $\mathcal{D} = \mathcal{D}(\mathcal{T}(S))$ pentru $\mathcal{T}(S)$, într-un dreptunghi D cu laturile paralele cu axele.
1. Determină dreptunghiuul D .
 2. Generează o permutare s_1, s_2, \dots, s_n a segmentelor din S .
 3. **for** $i \leftarrow 1$ **to** n
 4. **do** găsește mulțimea de trapeze T_0, T_1, \dots, T_k care intersectează segmentul s_i
 5. elimină T_0, \dots, T_k și le înlocuiește cu trapezele nou apărute
 6. elimină frunzele corespunzătoare din \mathcal{D} și creează noi frunze, actualizează \mathcal{D}

Rezultatul principal

- ▶ **Teoremă.** Fie S o mulțime de n segmente în poziție generală. Algoritmul HARTA TRAPEZOIDALA determină harta trapezoidală $\mathcal{T}(S)$ și o structură de căutare $\mathcal{D} = \mathcal{D}(\mathcal{T}(S))$ pentru $\mathcal{T}(S)$ în timp mediu $O(n \log n)$. Memoria medie ocupată de structura de căutare este $O(n)$ și pentru un punct arbitrar p timpul mediu de localizare este $O(\log n)$.

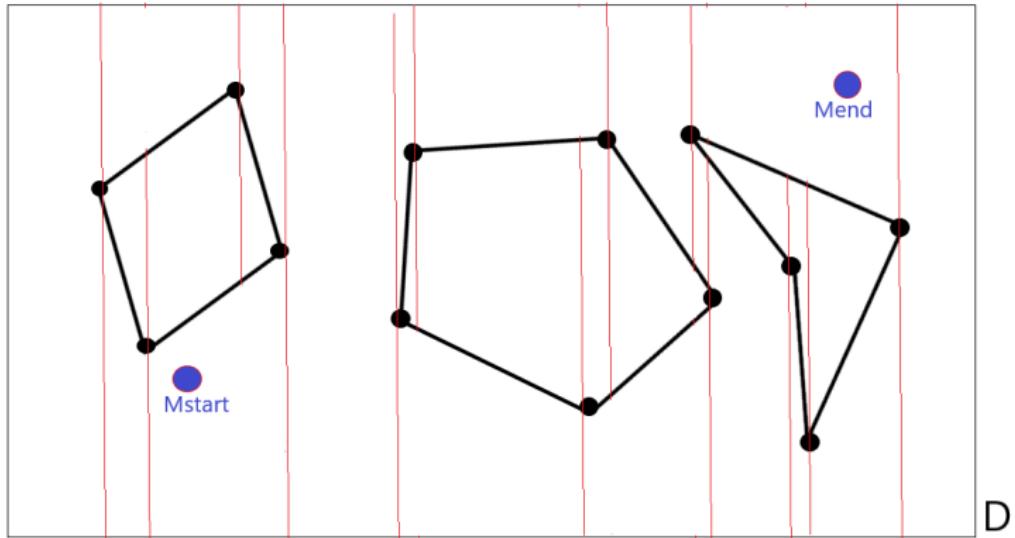
Cadru (simplificat)

- ▶ Context 2D



- ▶ **Obstacolele:** reprezentate de poligoane disjuncte P_1, P_2, \dots, P_k având n vârfuri
- ▶ **Robot:** punct \mathcal{R} care se deplasează prin translație
- ▶ **Simplificare (mărginire):** figura este inclusă într-un dreptunghi D ("bounding box").

Illustrare

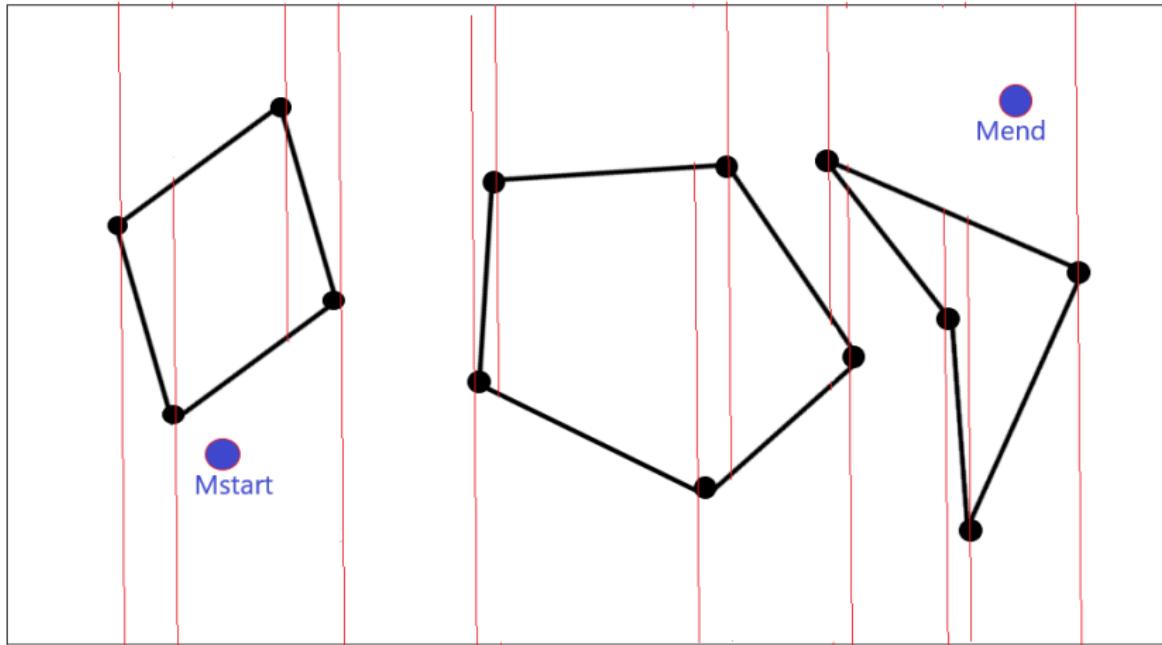


Pe unde se poate mișca robotul? (spațiul liber)
Găsirea unui drum?

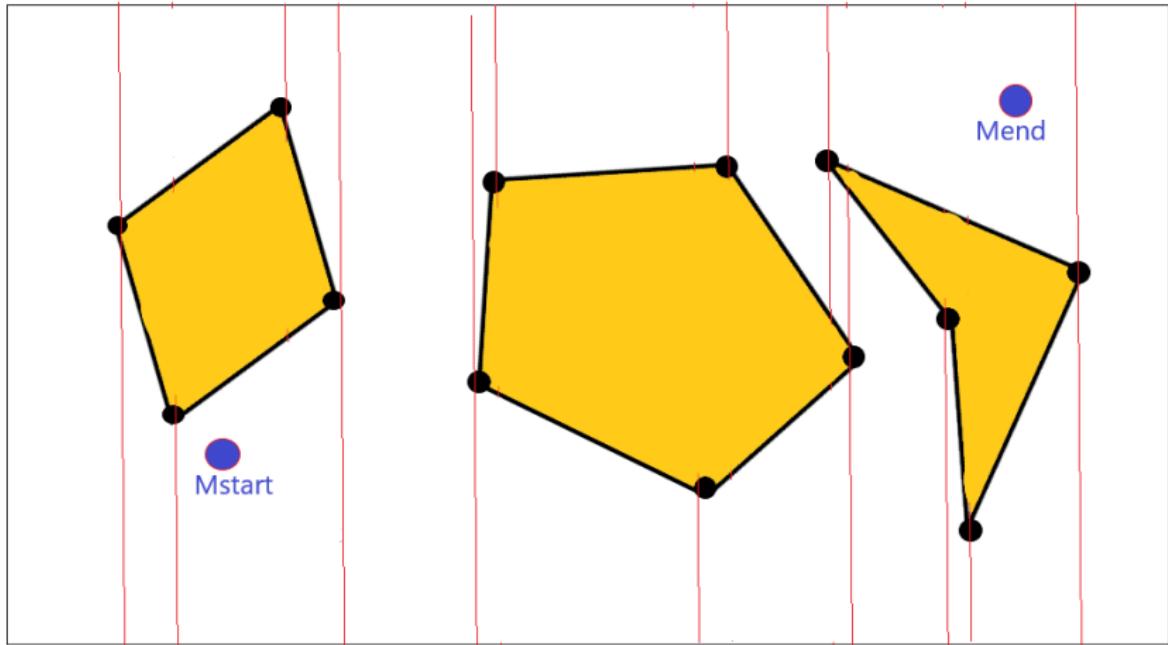
Pasul 1: determinarea spațiului liber

- ▶ Trapezele din interiorul obstacolelor au muchia “top” inclusă în frontiera superioară a unui obstacol: **aceste trapeze sunt eliminate**
- ▶ După acest pas se obține o hartă trapezoidală a spațiului liber \mathcal{C}_I , notată $\mathcal{T}(\mathcal{C}_I)$.

Illustrare



Illustrare



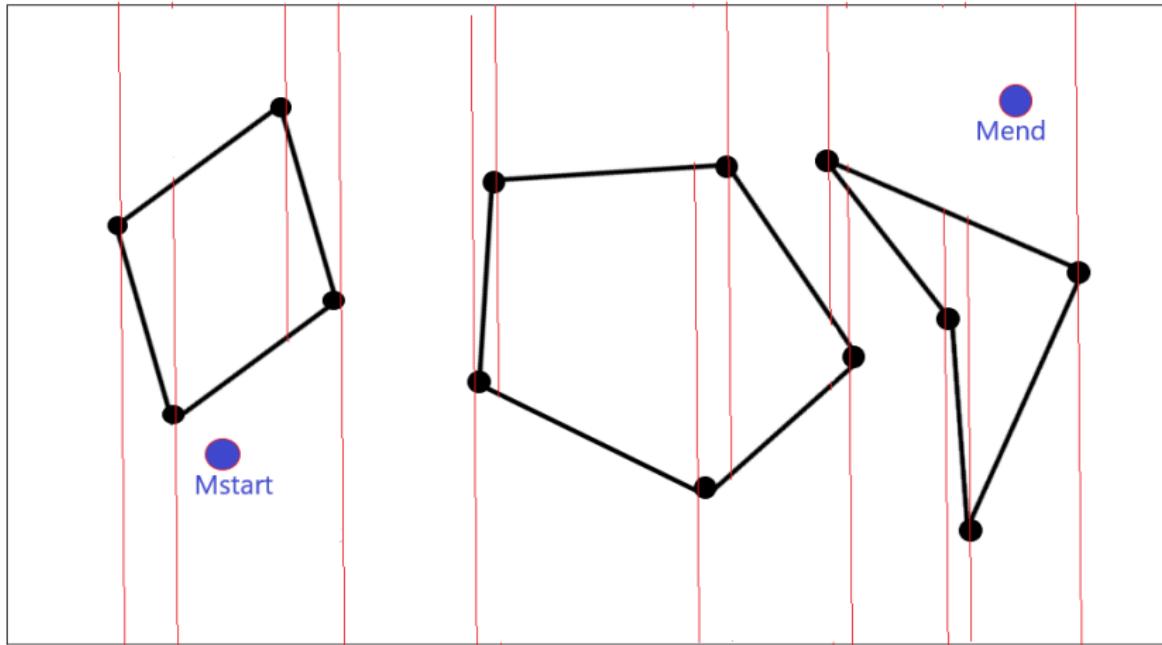
D

Pasul 2: determinarea unui drum

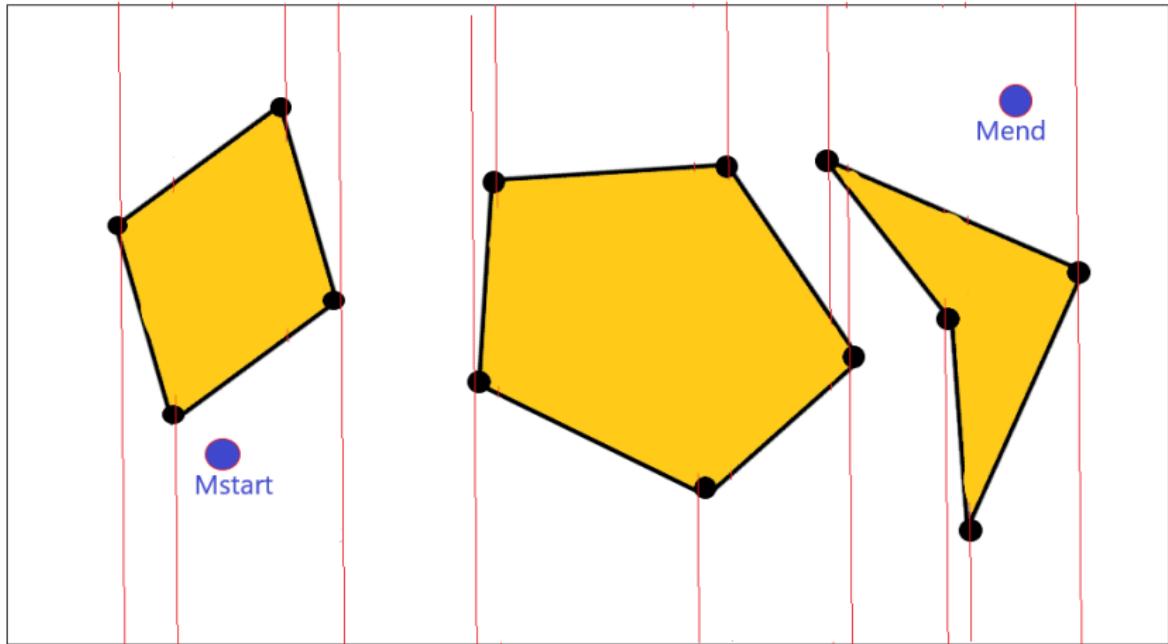
Date M_{start} , M_{end} se caută un drum de la M_{start} la M_{end} în interiorul spațiului liber.

- ▶ Dacă M_{start} și M_{end} sunt în interiorul același trapez: segmentul $[M_{\text{start}} M_{\text{end}}]$.
- ▶ Dacă sunt în trapeze diferite: se folosesc centrele de greutate (mijloacele liniilor mijlocii) ale trapezelor în care sunt situate punctele și mijloacele laturilor adiacente (muchii verticale!) Se utilizează un graf asociat spațiului liber (graful drumurilor - \mathcal{G}_d), care poate fi construit în timp liniar din $\mathcal{T}(\mathcal{C}_I)$. Nodurile acestui graf sunt centrele de greutate ale trapezelor și mijloacele extensiilor verticale.

Illustrare

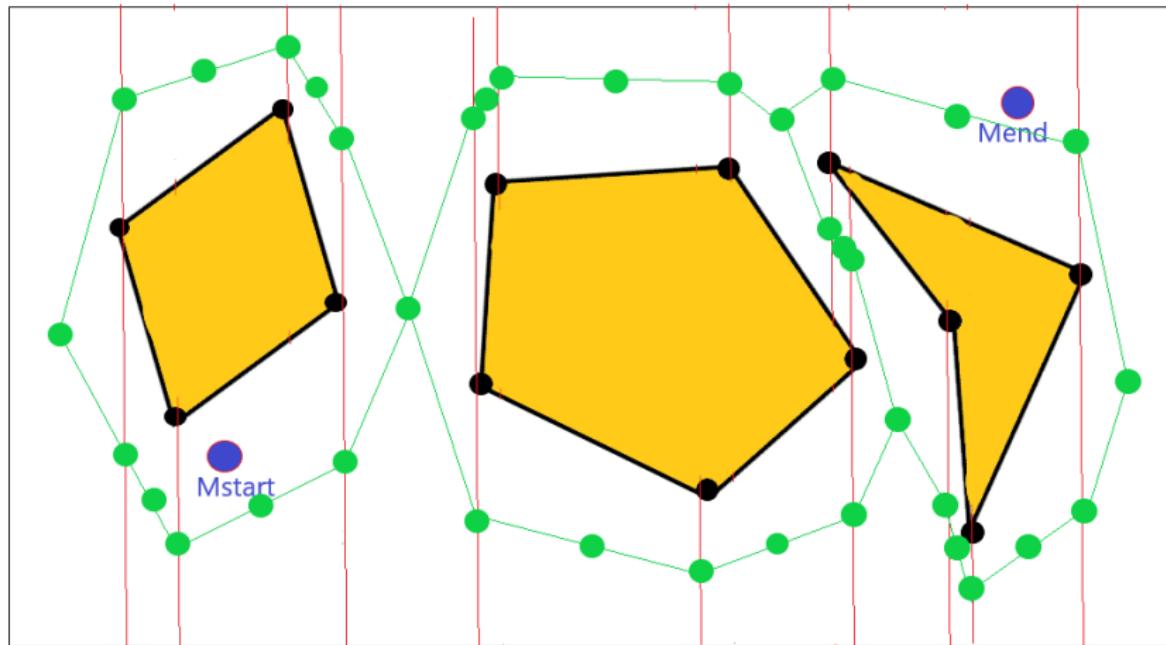


Illustrare



D

Illustrare



Algoritm DETERMINA SPATIU LIBER (S)

- ▶ **Input.** O mulțime \mathcal{P} de poligoane disjuncte.
 - ▶ **Output.** O hartă trapezoidală \mathcal{C}_l a spațiului liber (pentru un robot-punct).
1. Fie S mulțimea muchiilor poligoanelor din \mathcal{P} .
 2. Determină harta trapezoidală $\mathcal{T}(S)$, folosind algoritmul HARTA TRAPEZOIDALA.
 3. Elimină trapezele situate în interiorul poligoanelor și returnează subdiviziunea obținuta.

Algoritm DETERMINADRUM ($\mathcal{T}(\mathcal{C}_I)$, \mathcal{G}_d , M_{start} , M_{end})

- ▶ **Input.** Harta trapezoidală $\mathcal{T}(\mathcal{C}_I)$ a spațiului liber, graful drumurilor \mathcal{G}_d , punctul de start M_{start} , punctul final M_{end} .
 - ▶ **Output.** Un drum de la M_{start} la M_{end} , dacă există. În caz contrar, algoritmul precizează că nu există un drum.
1. cauță trapeze în $\mathcal{T}(\mathcal{C}_I)$ conținând M_{start} , respectiv M_{end} .
 2. **if** există Δ_{start} , respectiv Δ_{end} conținând M_{start} , respectiv M_{end}
 3. **then** fie v_{start} și v_{end} centrele Δ_{start} , Δ_{end} (noduri din \mathcal{G}_d)
 4. cauță un drum în \mathcal{G}_d de la v_{start} la v_{end} folosind BFS
 5. **if** există drum δ
 6. **then** indică drumul $[M_{\text{start}} v_{\text{start}}] \cup \delta \cup [v_{\text{end}} M_{\text{end}}]$
 7. **else** raportează că nu există drum de la M_{start} la M_{end}
 8. **else** raportează că nu există drum de la M_{start} la M_{end}

Rezultatul principal

- ▶ **Teoremă.** Fie \mathcal{R} un robot-punct care se deplasează într-o mulțime S de obstacole poligonale, având în total n muchii. Utilizând timp mediu de preprocesare $O(n \log n)$ pentru mulțimea S , un drum liber de coliziuni între două puncte fixate poate fi calculat (dacă există!) în timp mediu $O(n)$.