

GEOM DIFF

David Wiedemann

Table des matières

1	Rappels de geometrie euclidienne	4
1.1	Proprietes de la norme	4
2	Isometries et Similitudes	4
2.1	Proprietes de base des matrices orthogonales O_n	6
2.2	Etude de O_2	6
2.3	Etude de O_3	7
3	Geometrie des courbes	7
3.1	Exemples de courbes parametrees	8
3.2	Champs de vecteurs le long d'une courbe	9
3.3	Reparametrage d'une courbe	10
4	Courbure d'une courbe	12
4.1	Contact entre deux courbes	14
5	Repere de Frenet	15
5.1	Theoreme fondamental des courbes de \mathbb{R}^3	17
6	Courbes dans le plan oriente	18
7	Surfaces	21
7.1	Le concept de variete	21
7.2	Sous-Varietes de \mathbb{R}^n	22
7.2.1	Rappel de calcul differentiel	23
7.3	Le theoreme du rang constant	23

List of Theorems

1	Definition (Espace Euclidien)	4
1	Proposition (Cauchy-Schwartz)	4
2	Definition	4
3	Definition (similitude)	4

3	Theorème	5
5	Corollaire	5
4	Definition (Groupe special orthogonal)	6
5	Definition	6
8	Proposition	6
9	Theorème (Theoreme d'Euler)	7
6	Definition	7
7	Definition (Courbe parametrique)	7
8	Definition	8
9	Definition (Longueur d'une courbe)	8
10	Proposition	9
10	Definition (Champ vectoriel)	9
11	Definition (Le vecteur tangent)	9
11	Proposition (Regle de Leibniz)	10
12	Corollaire	10
12	Definition (Quantite)	10
13	Definition (Derivation naturelle)	11
14	Definition	11
15	Definition (Abscisse Curviligne)	12
17	Proposition	12
20	Proposition (Formule de l'acceleration)	13
16	Definition	13
17	Definition (Torsion)	13
22	Theorème (Formules de Serret-Frenet)	13
23	Theorème	14
18	Definition (Contact de courbes)	14
24	Theorème	14
19	Definition (Cercle osculateur)	15
25	Proposition	15
20	Definition (Reguliere au sens de Frenet)	15
27	Proposition	15
28	Proposition	16
21	Definition (Courbe a pente constante)	16
29	Proposition	16
22	Definition	18
23	Definition (Angle oriente)	18
24	Definition (L'operateur J)	18
25	Definition (Produit exterieur)	18
26	Definition	19
27	Definition	19
28	Definition (Fonction angulaire)	19

33	Proposition	19
34	Theorème (Theoreme fondamental des courbes planes)	20
29	Definition	20
35	Theorème (Theoreme des 4 sommests)	20
30	Definition (Variete)	21
31	Definition (Surface topologique)	21
32	Definition	22
33	Definition	22
34	Definition (Systeme de coordonnees)	22
35	Definition (Sous-Variete)	22
36	Definition (Dimension d'une sous variete)	22
37	Definition	23
36	Theorème (Theoreme du rang constant)	23
38	Definition	23
39	Definition (Rang maximal)	23
37	Lemme	23
38	Theorème (Theoreme du rang constant)	24
39	Corollaire (Theoreme d'inversion locale)	24

1 Rappels de geometrie euclidienne

Definition 1 (Espace Euclidien)

Un espace vectoriel euclidien est un espace vectoriel \mathbb{E}^n sur \mathbb{R} muni d'un produit scalaire $\langle \cdot \rangle : \mathbb{E}^n \times \mathbb{E}^n \rightarrow \mathbb{R}$ symétrique, défini positif.

Le produit scalaire standard sur \mathbb{R}^n est $\langle x, y \rangle = \sum_i x_i y_i$ ($\langle e_i, e_j \rangle = \delta_{ij}$).

Proposition 1 (Cauchy-Schwartz)

$\forall x, y \in \mathbb{E}^n, \langle x, y \rangle \leq \|x\| \|y\|$.

Remarque

La norme détermine le produit scalaire via les formules de polarisation

$$\langle x, y \rangle = \frac{1}{4} (\|x+y\|^2 - \|x-y\|^2) = \frac{1}{2} (\|x+y\|^2 - \|x\|^2 - \|y\|^2)$$

1.1 Propriétés de la norme

- $\|x\| \geq 0 \forall x \in \mathbb{E}^n$
- $\|x\| = 0 \iff x = 0$
- $\|\lambda x\| = |\lambda| \|x\|$
- $\|x \pm y\| \leq \|x\| + \|y\|$

Definition 2

- Si $x, y \in \mathbb{E}^n \setminus \{0\}$, on définit l'angle $\theta \in [0, \pi]$ par $\cos \theta = \frac{\langle x, y \rangle}{\|x\| \|y\|} \in [-1, 1]$ (par Cauchy-Schwarz).
- On a $\langle x, y \rangle = \|x\| \|y\| \cos \theta$

La distance entre $x, y \in \mathbb{E}^n$ est $d(x, y) = \|y - x\|$ (\mathbb{E}^n, d) est un espace métrique.

Les propriétés suivantes sont équivalentes

- $x \perp y$
- $\theta = \frac{\pi}{2}$
- $\|x - y\| = \|x + y\|$
- $\|x\|^2 + \|y\|^2 = \|x + y\|^2$

2 Isométries et Similitudes

Definition 3 (similitude)

Une application $f : \mathbb{E}^n \rightarrow \mathbb{E}^n$ est une similitude de rapport $\lambda > 0$ si f est bijective et

$$d(f(x), f(y)) = \lambda d(x, y)$$

Si $\lambda = 1$, on dit que f est une isométrie.

Theorème 3

Si $f : \mathbb{E}^n \rightarrow \mathbb{E}^n$ est une similitude, alors il existe $b \in \mathbb{E}^n$ et $g : \mathbb{E}^n \rightarrow \mathbb{E}^n$ linéaire tel que

$$f(x) = g(x) + b$$

Remarque

$b = f(0)$ et f linéaire $\iff f(0) = 0$

Preuve

On utilisera le theoreme fondamental de la geometrie affine :

Soit V un espace vectoriel de dimension finie sur \mathbb{R} et $f : V \rightarrow V$ une application bijective.

Alors f est affine si et seulement si f preserve les droites.

On ne donne pas la preuve mais une intuition : on pose $g(x) = f(x) - b$ ($b = f(0)$), donc $g(0) = 0$ et g preserve les droites.

Soit $f : \mathbb{E}^n \rightarrow \mathbb{E}^n$ une similitude de \mathbb{E}^n . On affirme que f preserve les droites

$$x, y, z \in \mathbb{E}^n \Rightarrow f(x), f(y), f(z)$$

quitte a renommer les points x, y, z , on a

$$x, y, z \text{ alignes} \iff d(x, z) = d(x, y) + d(y, z) \iff d(f(x), f(z)) = d(f(x), f(y)) + d(f(y), f(z))$$

Donc f affine implique $f(x) = g(x) + b$ ($b = f(0)$, g linéaire).

Il reste a voir que g est une λ -similitude \Rightarrow immediat a verifier. □

Corollaire 5

$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ est une similitude de rapport $\lambda > 0$ si et seulement si il existe $b \in \mathbb{R}^n$ et $A \in M_n(\mathbb{R})$, $A^T \cdot A = I$ tel que

$$f(x) = \lambda Ax + b$$

Preuve

$$\begin{aligned} \langle g(e_i), g(e_j) \rangle &= \frac{1}{4} \|g(e_i) + g(e_j)\|^2 - \|g(e_i) - g(e_j)\|^2 \\ &= \frac{1}{4} (\|g(e_i + e_j)\|^2 - \|g(e_i - e_j)\|^2) \\ &= \lambda^2 \langle e_i, e_j \rangle = \lambda^2 \delta_{ij} \end{aligned}$$

Soit A la matrice de g , alors $g(x) = Ax$, on a

$$\lambda^2 \delta_{ij} = \langle Ae_i, Ae_j \rangle$$

$$\begin{aligned}
&= \left\langle \sum_i a_{ij} e_i, \sum_i a_{ij} e_i \right\rangle \\
&= \sum_i \sum_j a_{ir} a_{js} \delta_{rs} = \sum_r a_{ir} a_{jr}
\end{aligned}
\quad \square$$

2.1 Proprietes de base des matrices orthogonales O_n

Pour une matrice $A \in M_n(\mathbb{R})$ les proprietes suivantes sont equivalentes

- $A \in O_n$
- A inversible avec $A^{-1} = A^T$
- Les collonnes/lignes de A forment une base orthonormee.
- $\langle Ax, Ay \rangle = \langle x, y \rangle$
- $\|Ax\| = \|x\|$
- $f(x) = Ax + b$ est une isometrie pour l'espace euclidien pour tout b

Remarque

Si $A \in O_n \Rightarrow \det A = \pm 1$ et $\det : O_n \rightarrow \{\pm 1\}$

Definition 4 (Groupe special orthogonal)

On definit

$$SO(n) = O_n \cap SL_n(\mathbb{R})$$

Definition 5

Une transformation affine $f : V \rightarrow V$, V un \mathbb{R} -ev est directe (ou qu'elle preserve l'orientation) si son determinant est positif (ou le determinant de la partie lineaire de f .) Une isometrie directe s'appelle un déplacement de \mathbb{E}^n si $f(x) = Ax + b, A \in SO(n)$

Remarque

$$SE(n) = SO(n) \rtimes \mathbb{R}^n$$

2.2 Etude de O_2

Proposition 8

Une matrice $A \in O_2$ s'ecrit

$$A = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

si $\det A = 1$, ou

$$S_\phi = \begin{pmatrix} \cos 2\phi & \sin 2\phi \sin 2\phi & -\cos 2\phi \end{pmatrix}$$

Preuve

$A \in O_2$ si et seulement si les colonnes de A forment une base orthonormée. Donc il existe θ tel que la 1^{ère} colonne est de la forme $\begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}$ et la forme de la 2^{ème} colonne en suit. \square

2.3 Etude de O_3

Theorème 9 (Theoreme d'Euler)

Tout déplacement (isométrie qui préserve l'orientation) qui fixe un point, fixe un axe et c'est une rotation autour de cet axe.

Preuve

On identifie l'espace euclidien à \mathbb{R}^3 . Soit $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$, qui fixe un point on suppose que $f(0) = 0$.

On a $f(x) = Ax$.

On affirme qu'il existe $U \in \mathbb{R}^3, U \neq 0$ tel que $Au = u$.

En effet 1 est valeur propre de A car $\det(A - \text{Id}) = 0$ parce que

$$\det(A - \text{Id}) = \det(A^T) \det(A - \text{Id}) = \det(\text{Id} - A^T) = \det(\text{Id} - A) = (-1)^3 \det(A - \text{Id})$$

\square

Lecture 2: Courbes

Wed 29 Sep

3 Geometrie des courbes

Une courbe peut être conçue comme :

- Le lieu des points géométriques qui satisfont à une certaine contrainte/condition
- La trajectoire d'un point qui se déplace dans le plan ou l'espace.
- Une courbe peut être engendrée par un mécanisme
- Une courbe peut correspondre à un phénomène optique.

Le premier point de vue va conduire à une description implicite de la courbe par une équation dans \mathbb{R}^2 ou deux équations dans l'espace.

Definition 6

Une courbe algébrique dans le plan est un ensemble du type $\Gamma : \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 | f(x, y) = 0\}$.

La courbe est algébrique si $f \in \mathbb{R}[x, y]$

Definition 7 (Courbe paramétrique)

Une courbe paramétrique dans \mathbb{R}^n est une application continue :

$$\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$$

avec $I \subset \mathbb{R}$ est un intervalle, $u \in I$ est le parametre.

L'image de γ est la trace de γ

Definition 8

- La courbe α est de classe C^k ($k \geq 0$) si $\alpha : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ est de classe C^k par $\alpha(u) = (\alpha_1(u), \dots, \alpha_n(u))$ et $\alpha_j : I \rightarrow \mathbb{R}$ est de classe C^k .
- Si α est C^1 et $u_0 \in I$, le vecteur vitesse est

$$\dot{\alpha}(u_0) = \frac{d\alpha}{du}(u_0)$$

L'acceleration sera $\ddot{\alpha}(u_0) = \frac{d^2\alpha}{du^2}(u_0)$

- La droite tangente a γ en u_0 est la droite par $\alpha(u_0)$ et de direction $\dot{\alpha}(u_0)$

$$T_{\alpha, u_0} : \lambda \mapsto \alpha(u_0) + \lambda \dot{\alpha}(u_0)$$

- La vitesse de α en u_0 est $V_\alpha(u_0)$ (en supposant α differentiable en u_0)
- Le point $\alpha(u_0)$ est regulier si $\dot{\alpha}(u_0) \neq 0$ et singulier si $\dot{\alpha}(u_0) = 0$
- Le point $\alpha(u_2)$ est biregulier si $\alpha \in C^2$ et $\dot{\alpha}(u_0), \ddot{\alpha}(u_0)$ sont lineairement independants .
- Si α est bireguliere en u_0 , le plan par $\alpha(u_0)$ en direction $\dot{\alpha}(u_0), \ddot{\alpha}(u_0)$ est le plan osculateur de α en u_0 .

3.1 Exemples de courbes parametrees

- La cubique

$$\alpha(u) = (au, bu^2, cu^3)$$

—

$$\beta(u) = (u^2, \dots, u^{n+1})$$

- La droite en parametrage affine, par p et q est

$$\gamma(t) = p + t(q - p)$$

- Le cercle C de centre $p \in \mathbb{R}^n$ dans un plan (affine) $\Pi \subset \mathbb{R}^n$ de rayon r se parametrise

$$C(t) = p + r (\cos(\omega t)b_1 + \sin(\omega t)b_2)$$

ou $\{p, b_1, b_2\}$ est une repere affine orthonorme de Π .

- L'helice circulaire droite est

$$\gamma(u) = (a \cos(u), a \sin(u), bu)$$

Definition 9 (Longueur d'une courbe)

La longueur d'une courbe $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ de classe C^1 est

$$l(\gamma) = \int_a^b V_\gamma(u) du$$

Proposition 10

La longueur verifie les proprietes suivantes :

- Additivite : Si $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ est une courbe C^1 , alors $l(\gamma|_{[a, c]}) + l(\gamma|_{[c, b]}) = l(\gamma|_{[a, b]})$
- La longueur est invariante par isometrie.
- Pour f une similitude de rapport $\lambda > 0$, alors

$$l(f \circ \gamma) = \lambda l(\gamma)$$

—

$$l(\gamma|_{[a, b]}) \geq d(\gamma(a), \gamma(b))$$

avec egalite si et seulement si γ est le segment $[\gamma(a), \gamma(b)]$.

Preuve

- Suit de

$$l(\gamma|_{[a, b]}) = \int_a^b V_\gamma(u) du = \int_a^c V_\gamma(u) du + \int_c^b V_\gamma(u) du$$

- On sait que $f(x) = \lambda Ax + b$, A orthogonal, donc pour $\tilde{\gamma}(u) = f(\gamma(u))$

$$\tilde{\gamma}' = \lambda A \gamma'(u)$$

$$l(\tilde{\gamma}) = \int_a^b V_{\tilde{\gamma}}(u) du = \lambda l(\gamma)$$

- Soit $p = \gamma(a)$, $q = \gamma(b)$.

On note $w = \frac{q-p}{\|q-p\|}$ et on definit

$$g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R} \quad g(u) = \langle \gamma(u) - p, w \rangle$$

Alors

$$\frac{dg}{du} = \langle \dot{\gamma}(u), w \rangle \leq \|\dot{\gamma}(u)\| \|w\| = V_\gamma(u)$$

Ainsi,

$$\int_a^b \frac{dg}{du} du = g(b) - g(a) = \langle q - p, w \rangle = \|q - p\|$$

□

3.2 Champs de vecteurs le long d'une courbe**Definition 10 (Champ vectoriel)**

Un champ de vecteurs le long d'une courbe $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ est la donnee $\forall u \in I$ d'un vecteur $W(u) = \sum_j w_j(u) e_j$.

Ce champ est de classe C^k si $w_j : I \rightarrow \mathbb{R}$ est de classe C^k .

Definition 11 (Le vecteur tangent)

Si γ est reguliere on definit

$$T_\gamma(u) = \frac{\dot{\alpha}(u)}{V_\gamma(u)}$$

Si γ est bireguliere, alors le champ normal principal est donne par

$$N_\gamma(u) = \frac{\ddot{\alpha}(u) - \langle \ddot{\alpha}(u), t \rangle t}{\|\ddot{\alpha}(u) - \langle \ddot{\alpha}(u), t \rangle t\|}$$

Proposition 11 (Regle de Leibniz)

—

$$\frac{d}{du} \langle Z(u), W(u) \rangle = \langle \dot{Z}(u), W(u) \rangle + \langle Z(u), \dot{W}(u) \rangle$$

Corollaire 12

— Si $\langle Z(u), W(u) \rangle = c$, alors

$$\langle \dot{W}, Z \rangle = - \langle W, \dot{Z} \rangle$$

— Si $\|w\| = c \Rightarrow \langle \dot{w}, w \rangle = 0$

Lecture 3: Reparametrage

Wed 06 Oct

3.3 Reparametrage d'une courbe

On veut formaliser la notion que deux courbes α, β de \mathbb{R}^n representent la "meme" courbe geometrique.

On veut $\alpha(u) = \beta(t)$ avec $u = h(t) (= u(t))$.

Plus precisement, si $\alpha : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ et $\beta : J \rightarrow \mathbb{R}^n$ ($u \in I, t \in J$), alors α est un reparametrage si il existe un diffeomorphisme $h : J \rightarrow I, t \mapsto u = u(t) = h(t)$, tel que $\alpha = \beta \circ h$.

Remarque

La condition que deux courbes sont un reparametrage l'une de l'autre est une relation d'equivalence et une classe d'equivalence est une courbe geometrique

Definition 12 (Quantite)

Une quantite ou une propriete d'une courbe est geometrique si elle est invariante par reparametrage.

Sinon la quantite est dite cinematique.

Exemple

1. La trace d'une courbe est une propriete geometrique

2. La notion de regularite, biregularite sont geometriques
3. Le plan osculateur est une notion geometrique.
4. La longueur d'une courbe est geometrique.

Preuve

On suppose $\alpha : I \rightarrow \mathbb{R}^n, \beta : J \rightarrow \mathbb{R}^n, \alpha(u) = \beta(t), t = h(u)$.

On a

$$l_\alpha = \int_I V_\alpha(u) du, l_\beta = \int_J V_\beta(t) dt$$

avec $V_\alpha = \left\| \frac{d\alpha}{du} \right\|, V_\beta = \left\| \frac{d\beta}{dt} \frac{du}{dt} \right\| = \left| \frac{du}{dt} \right| V_\alpha(u)$.

Donc $V_\beta(t) dt = \pm V_\alpha(u) du$ et donc $l_\beta = l_\alpha$. □

En general, si $S_\beta(t)$ est une quantite geometrique, alors $\frac{d}{dt} S_\beta$ n'est en general pas geometrique, mais $\frac{1}{V_\beta(t)} \frac{d}{dt} S_\beta$

Preuve

On a $S_\beta(t) = S_\alpha(u)$ et $\frac{1}{V_\beta(t)} \frac{d}{dt} = \frac{1}{V_\alpha(u)} \frac{d}{du}$ □

Exemple

Le vecteur unitaire tangent $\vec{T}_\beta(t)$ est une quantite geometrique.

Preuve

On a $T_\beta(t) = \frac{\dot{\beta}(t)}{\|\dot{\beta}(t)\|} = \frac{1}{V_\beta(t)} \frac{d\beta}{dt}$.

Ainsi, $T_\alpha(u) = \frac{1}{V_\alpha(u)} \frac{d\alpha}{du}$ □

Definition 13 (Derivation naturelle)

On definit

$$\frac{1}{V_\beta(t)} \frac{d}{dt}$$

comme etant la derivation naturelle le long de la courbe.

Contreexemples

La vitesse, le vecteur vitesse et l'acceleration sont des quantites cinematiques.

Definition 14

On dit que $V_\alpha(u) du$ est la differentielle naturelle le long de la courbe

Exemple

1. Masse d'un fil metalique inhomogene.

La quantite utile est la densite lineaire de masse $\rho : I \rightarrow \mathbb{R}_+$.

La masse sera alors $M = \int_I \rho(u) V_\alpha(u) du$

2. Centre de gravite

$$G = \frac{1}{M} \int_I \alpha(u) \rho(u) V_\alpha(u) du$$

Definition 15 (Abscisse Curviligne)

Soit $\alpha : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ une courbe reguliere et $u_0 \in I$.

L'abscisse curviligne ou parametre naturel de α par rapport au point initial $\alpha(u_0)$ est la fonction

$$S = S_\alpha : I \rightarrow \mathbb{R}$$

definie par

$$S = \int_{u_0}^u V_\alpha(\zeta) d\zeta$$

On dit que α est parametree naturellement si $S_\alpha(u) = u \iff V_\alpha(u) = 1$

Proposition 17

Toute courbe C^1 reguliere peut se reparametriser natruellement.

Preuve

Soit $\alpha : I \rightarrow \mathbb{R}^n$, C^1 reguliere et $u_0 \in I$.

On pose

$$s = s(u) = \int_{u_0}^u V_\alpha(u) du$$

Alors la fonction s definit un diffeomorphisme

$$s : I \rightarrow J$$

□

4 Courbure d'une courbe

Soit $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ une courbe parametree reguliere de classe C^2 .

Le vecteur de courbure est le champ le long de γ

$$\vec{K}_\gamma(u) = \frac{1}{V_\gamma(u)} \dot{\vec{T}}_\gamma(u)$$

La courbure de γ est alors la fonction

$$k_\gamma = \left\| \vec{K}_\gamma(u) \right\|$$

Remarque

Si γ est parametree naturellement, alors

$$k_\gamma(u) = \left\| \frac{d^2 \gamma}{du^2} \right\|$$

Remarque

Le vecteur de courbure et la courbure sont des quantites geometriques.

Proposition 20 (Formule de l'acceleration)

Soit $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ une courbe de classe C^2 , alors son acceleration est

$$\ddot{\gamma} = \dot{V}_\gamma(t) + V_\gamma^2(t) \vec{K}_\gamma(t)$$

Preuve

On a

$$\dot{\gamma}(t) = V_\gamma(t) \vec{T}_\gamma(t)$$

Donc

$$\ddot{\gamma} = \dot{V}_\gamma(t) \vec{T}_\gamma(t) + V_\gamma(t) \dot{\vec{T}}_\gamma(t) = V' K + V^2 K \quad \square$$

Remarque

On a toujours $\vec{k} \perp \vec{T}$

Definition 16

Soit $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^3$ bireguliere de classe C^3 .

On definit le repere mobile de Frenet de γ est le repere $\{\gamma(t), T, N_\gamma(t), B_\gamma(t)\}$

ou

$$T_\gamma(t) = \frac{\dot{\gamma}}{V_\gamma(t)}, \quad N_\gamma(t) = \frac{\ddot{\gamma} - \langle \dot{\gamma}, T \rangle T}{\|\ddot{\gamma} - \langle \dot{\gamma}, T \rangle T\|} \quad B = T \times N$$

Definition 17 (Torsion)

La torsion de γ est

$$\tau_\gamma(t) = \frac{1}{V_\gamma(t)} \langle \dot{B}, N \rangle$$

Theoreme 22 (Formules de Serret-Frenet)

$$\begin{cases} \frac{1}{V_\gamma} \dot{T}_\gamma = \kappa_\gamma N \\ \frac{1}{V_\gamma} \dot{N}_\gamma = -\kappa_\gamma T_\gamma + \tau_\gamma B_\gamma \\ \frac{1}{V_\gamma} \dot{B}_\gamma = -\tau_\gamma N_\gamma \end{cases}$$

Preuve

1. Par definition, du vecteur de courbure.

2.

$$\frac{1}{V} N' = \frac{1}{V} (\langle N', T \rangle T + \langle N', B \rangle B)$$

or

$$\begin{aligned} \langle N', T \rangle &= -\langle N, T' \rangle \\ \langle N', B \rangle &= 0 \end{aligned}$$

$$\langle N', B \rangle = V_\gamma$$

De meme

$$B' = \langle B', T \rangle T + \langle B', N \rangle N + \langle B', B \rangle B \quad \square$$

Lecture 4: ...

Wed 13 Oct

Theorème 23

La courbure de γ est la variation naturelle de la direction de γ

Preuve

Soit $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ une courbe C^2 que l'on suppose paramétrée naturellement.

On fixe $p = \gamma(s_0)$ et on note

$$\phi(s) = \phi_{s_0}(s) = (T_\gamma(s), \hat{T}_\gamma(s_0))$$

On a par trigonometrie elementaire que

$$\|T(s) - T(s_0)\| = 2 \sin\left(\frac{\phi(s)}{2}\right)$$

Donc

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow s_0+} \frac{\phi(s) - \phi(s_0)}{s - s_0} &= \lim_{s \rightarrow s_0} \frac{\phi(s)}{2 \sin(\phi(s)/2)} \frac{2 \sin(\frac{\phi(s)}{2})}{s - s_0} \\ &= \lim_{s \rightarrow s_0} \frac{\phi(s)}{2 \sin(\frac{\phi(s)}{2})} \frac{\|T(s) - T(s_0)\|}{s - s_0} \\ &= \lim_{s \rightarrow s_0+} \left\| \frac{T(s) - T(s_0)}{s - s_0} \right\| = \kappa(s_0) \end{aligned}$$

Donc on prouve que $\frac{d}{ds}|_{s_0+} \phi(s) = \kappa(s_0)$

4.1 Contact entre deux courbes

Definition 18 (Contact de courbes)

Soit $\alpha, \beta : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ deux courbes C^k .

Ces deux courbes ont un contact d'ordre k en $t_0 \in I$ si

$$\alpha(t_0) = \beta(t_0) \text{ et } \frac{d^n}{dt^n} \alpha(t) = \frac{d^n}{dt^n} \beta(t)$$

Theorème 24

α et β ont un contact d'ordre 2 en $t_0 \iff$

$$\alpha(t_0) = \beta(t_0), T_\alpha(t) = T_\beta(t), V_\alpha(t_0) = V_\beta(t_0)$$

et

$$\kappa_\alpha(t_0) = \kappa_\beta(t_0)$$

Definition 19 (Cercle osculateur)

Soit $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ bireguliere et $u_0 \in I$.

On appelle cercle osculateur de γ en u_0 le cercle contenu dans le plan osculateur de γ et de centre et rayon

$$p = \gamma(u_0) + \rho(u_0)\mathcal{N}_\gamma(u_0)$$

et rayon $\rho(u_0) = \frac{1}{\kappa_\gamma(u_0)}$

Proposition 25

Le cercle osculateur est l'unique cercle qui a un contact d'ordre 2.

5 Repere de Frenet

Definition 20 (Reguliere au sens de Frenet)

La courbe γ est reguliere au sens de Frenet si $\gamma \in C^2$ et γ est bireguliere et $u \rightarrow N_\gamma(u)$ est C^1 .

Remarque

- Si γ est bireguliere et C^3 , alors γ est Frenet-reguliere.
- Si γ est frenet reguliere, alors T_γ et B_γ sont de classe C^1 .

Si γ est Frenet-reguliere, alors la torsion $\tau_\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}$ est

$$\tau_\gamma = \frac{1}{V_\gamma(u)} \langle \dot{N}, B_\gamma \rangle$$

Proposition 27

γ est une courbe plane $\iff \tau_\gamma = 0$

Preuve

Si γ est plane, alors le plan osculateur est constant $\iff B_\gamma$ est constant $\Rightarrow \dot{B}_\gamma = 0 \Rightarrow \tau_\gamma = 0$.

Supposons que $\tau_\gamma = 0$.

Soit $p = \gamma(u_0) \in \mathbb{R}^3$.

On definit

$$h(u) = \langle \gamma(u) - p, B_\gamma \rangle$$

Notons que $\dot{B}_\gamma = -\tau_\gamma N = 0$ est constant.

Donc

$$\frac{dh}{du} = \langle \dot{\gamma}(u), B \rangle = V_\gamma \langle T_\gamma, B \rangle = 0$$

Donc h est constant et donc $\langle \gamma(u), B \rangle = \langle p, B \rangle \forall u \in I$ qui est l'équation d'un plan. \square

Proposition 28

La torsion mesure la variation angulaire du plan osculateur, c'est à dire que si

$$\theta(s) = (B_\gamma(s), \hat{B}_\gamma(s_0))$$

Preuve

Alors

$$\frac{d}{ds}|_{s_0} \theta(s) = |\tau_\gamma(s_0)|$$

\square

On applique la meme preuve que Serret-Frenet.

Definition 21 (Courbe a pente constante)

Une courbe $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^3$ de classe C^1 est dite de pente constante si $\dot{\gamma}(u)$ fait un angle constant avec une direction fixe.

Proposition 29

Soit $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^3$ Frenet reguliere, alors γ est de pente constante \iff

$$\frac{\tau}{\kappa} = \text{cste.}$$

Preuve

On suppose que γ est parametree naturellement et $\langle T_\gamma(s), A \rangle = a = \text{constante}$.

$$0 = \frac{d}{ds} \langle T, A \rangle = \langle \dot{T}, A \rangle = \kappa \langle N, A \rangle$$

or $\kappa \neq 0$ donc $\langle N, A \rangle = 0$ ce qui implique que $b = \langle B, A \rangle$.

On a donc

$$0 = \frac{d}{ds} \langle N, A \rangle = \langle \kappa T - \tau B, A \rangle$$

$$\iff \kappa \langle T, A \rangle = \tau \langle B, A \rangle$$

$$\iff \frac{\tau}{\kappa} = \text{constante}$$

Supposons donc que $\frac{\tau}{\kappa} = \text{constante}$.

On pose $\lambda = \frac{\tau}{\kappa}$ et $A = \lambda T + B$, alors

$$\langle T, A \rangle = \lambda \langle T, T \rangle + \langle B, T \rangle = \lambda = \text{constant}$$

Verifions que A est constant, car

$$\frac{dA}{ds} = \lambda \dot{T} + \dot{B} = \lambda \kappa N - \tau N = 0$$

\square

5.1 Theoreme fondamental des courbes de \mathbb{R}^3

Etant donne deux fonctions continues sur l'intervalle I $\kappa, \tau : I \rightarrow \mathbb{R}$ avec $\kappa(s) > 0$.

Alors il existe une courbe $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^3$ Frenet reguliere telle que sa courbure et sa torsion sont donnees par κ et τ ie. $\kappa(s) = \kappa_\gamma(s), \tau(s) = \tau_\gamma(s) \forall s \in I$.

Cette courbe est unique a un deplacement pres.

Preuve

On prouve d'abord l'unicite.

On suppose que $\gamma_1, \gamma_2 : I \rightarrow \mathbb{R}^3$ sont deux courbes Frenet regulieres, de vitesse 1 tel que $\delta_{\gamma_1} = \delta_{\gamma_2} = \delta$ et $\kappa_{\gamma_1} = \kappa_{\gamma_2} = \kappa$.

Quitte a appliquer une translation et une rotation a γ_2 , on peut supposer que $\gamma_1(0) = \gamma_2(0)$.

$$T_1(0) = T_2(0), N_1(0) = N_2(0), B_1(0) = B_2(0)$$

On note $F_i(s) \in SO(3)$ la matrice dont les colonnes sont T_i, N_i, B_i .

Alors on calcule

$$\frac{dF_i}{ds} = F_i(s)\Omega(s)$$

avec

$$\Omega(s) = \begin{pmatrix} 0 & -\kappa & 0 \\ \kappa & 0 & -\tau \\ 0 & \tau & 0 \end{pmatrix}$$

Cette equation matricielle est equivalente aux equations de Serret-Frenet.

On calcule

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds}(F_1(s)F_2(s)^{-1}) &= \frac{d}{ds}(F_1F_2^T) \\ &= \dot{F}_1F_2^T + F_1\dot{F}_2^T \\ &= (F_1\Omega)F_2^T + F_1(F_2\Omega)^T \\ &= F_1\Omega F_2^T + F_1\Omega^T F_2 \\ &= 0 \end{aligned}$$

Or $F_1(0) \cdot F_2(0)^{-1} = \text{Id}$ et donc $F_1(s) = F_2(s) \forall s \in I$.

Donc $T_1(s) = T_2(s) \forall s \in I$. Donc $\gamma'_1 = \gamma'_2$ et donc $\gamma_1 = \gamma_2$.

Existence

Sont donnees $\kappa, \tau : I \rightarrow \mathbb{R}$, on veut construire γ .

Le theoreme de Cauchy-Lipschitz sur les edo donne l'existence d'une solution au probleme de Cauchy

$$\frac{dF}{ds} = F(s)\Omega(s), F(0) = \text{Id}$$

On affirme que $F(s) \in SO(3) \forall s$.

En effet, on a $F(0)F(0)^T = \text{Id}$.

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} F(s)F(s)^T &= \dot{F}F^T + F\dot{F}^T \\ &= F\Omega F^T - F\Omega^T F^T = 0 \end{aligned} \quad \square$$

Et donc $F(s) \in O(3)$ et $F(s) \in SO(3)$ car l'application \det est continue.
On pose donc $\gamma(s) = \int_0^s T(u)du$

Lecture 5: ...

Wed 20 Oct

6 Courbes dans le plan orienté

Definition 22

On dit que deux bases d'un ev réel de dimension finie.

On dit que deux bases ont la même orientation si la matrice de changement de base a déterminant positif.

C'est une relation d'équivalence appelée une "classe d'orientation"

Un espace vectoriel est orienté si on en a choisi une classe d'orientation.

L'orientation canonique de \mathbb{R}^n est celle associée à la base canonique.

Definition 23 (Angle orienté)

L'angle orienté entre deux vecteurs \vec{a} et \vec{b} dans un plan orienté est défini par

$\hat{\vec{a}, \vec{b}} = \pm \hat{\vec{a}, \vec{b}}$ avec le signe $+$ si $\{\vec{a}, \vec{b}\}$ est une base positive (directe) et $-$ sinon.

Definition 24 (L'opérateur J)

On note $J = R_{+\frac{\pi}{2}}$ la rotation dans un plan orienté d'angle $+\frac{\pi}{2}$.

Dans une base orthonormée directe, on a $J = R_{+\frac{\pi}{2}} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$

Definition 25 (Produit extérieur)

Le produit extérieur de deux vecteurs \vec{a} et \vec{b} dans un plan orienté est

$$\vec{a} \wedge \vec{b} = \langle \vec{a}, J\vec{b} \rangle$$

Remarque

1. $a \wedge b = \|a\| \|b\| \sin \theta$, alors

2. Si on plonge $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$

$$\vec{a} \wedge \vec{b} = \langle \vec{a} \times \vec{b}, e_3 \rangle$$

Definition 26

Si $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^2$ une courbe de classe C^1 , alors on definit le vecteur normal oriente a γ

$$N^{or}(u)$$

par la condition que

$$T_\gamma \wedge N^{or} > 0 \iff \{T, N^{or}\} \text{ est orthonormee directe}$$

On definit la courbure orientee d'une courbe reguliere de classe C^2 par

$$k(u) = \kappa^{or}(u) = \frac{1}{V} \langle \dot{T}, N^{or} \rangle$$

Definition 27

On dit qu'un arc de courbe γ de classe C^2 dans un plan oriente est convexe si $k > 0$, concave si $k < 0$.

On dit que γ est une "spirale" si la courbure est non nulle et monotone.

Un point d'inflexion si la courbure change de signe en ce point.

Un point est un "sommet" si la derivee de la courbure change de signe

Remarque

Le graphe de $f(x)$ a un point d'inflexion en $f''(x) = 0$ et $f''(x)$ change de signe

Definition 28 (Fonction angulaire)

La fonction angulaire d'une courbe plane (dans un plan oriente).

Soit $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ une courbe C^2 .

On appelle fonction angulaire de γ la fonction

$$\phi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$$

verifiant

1. ϕ est continue
2. $\phi(u) = \angle(\hat{\gamma}(u), \vec{d}) \mod 2\pi$

Remarque

Si on prend $\vec{d} = e_1$, alors

$$T = \frac{\dot{\gamma}}{\|\dot{\gamma}\|}$$

Proposition 33

La courbure orientee est la variation naturelle de la fonction angulaire.

Preuve

On a $T = (\cos \phi, \sin \phi)$, donc

$$N = (-\sin \phi, \cos \phi)$$

et de meme

$$k = \frac{1}{V} \langle \dot{T}, N \rangle \quad \square$$

Theorème 34 (Theoreme fondamental des courbes planes)

Soit $k : [0, L] \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue, alors il existe une courbe $\gamma : [0, L] \rightarrow \mathbb{R}^2$, de classe C^2 de courbure $k(s)$ et de vitesse 1.

Cette courbe est unique a isometrie directe pres.

Preuve

Existence

La fonction $k : [0, L] \rightarrow \mathbb{R}$ est donnee. On pose

$$\phi(s) = \int_0^s k(u) du$$

Puis on pose $T(s) = (\cos \phi(s), \sin(\phi(s)))$, on a donc $N(s) = (-\sin(\phi(s)), \cos \phi(s))$.

On pose encore

$$X(s) = \int_0^s \cos(\phi(s)) ds, Y(s) = \int_0^s \sin(\phi(s)) ds$$

On pose enfin $\gamma(s) = (X(s), Y(s))$.

L'existence est donc prouvee.

L'unicite vient de $\frac{d\phi}{ds} = k$ \square

Definition 29

On dit qu'une courbe $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ est une courbe fermee de classe C^k si $\gamma(a) = \gamma(b)$ et les derivees coïncident.

Une telle courbe s'appelle aussi courbe periodique, car on peut l'etendre a

$$\gamma : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$$

Theorème 35 (Theoreme des 4 sommets)

Toute courbe plane C^2 -fermee admet au moins 4 changement de signes de $\frac{dk}{du}$

Preuve

On montre le resultat dans le cas d'une courbe convexe.

Soit $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ une courbe C^2 -convexe. Alors on a $k(a) = k(b)$ et on note $\gamma(s) = (X(s), Y(s))$.

On suppose $V_\gamma(s) = 1$, alors on a

$$\frac{dT}{ds} = kN$$

avec

$$T = (\dot{x}, \dot{y}), N = JT = (-\dot{y}, \dot{x})$$

Ainsi,

$$\ddot{x} = -k\dot{y}, \ddot{y} = k\dot{x}$$

On a alors

$$\int_a^b \dot{k}(s) ds = 0$$

et

$$\int_a^b k(s)\dot{y}(s)ds = -\int_a^b \ddot{y}(s)ds = 0$$

et

$$\int_a^b k(s)\dot{x}(s)ds = 0$$

Supposons que $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ est C^2 -fermée avec deux changements de signe de $\dot{k}(s)$, par exemple $\dot{k}(s) > 0$ sur (a, c) et $\dot{k}(s) < 0$ sur (c, b) . Notons $p = \gamma(a) = \gamma(b)$, $q = \gamma(c)$, soit

$$h(x, y) = Ax + By + C = 0$$

l'équation de la droite par p et q .

Alors le signe de $\dot{k}(s)(Ax + By + C)$ est constant.

Mais

$$0 < \int_a^b f(s)ds = A \int_a^b \dot{k}x(s)ds + B \int_a^b \dot{k}y(s)ds + C \int_a^b \dot{k}ds = 0$$

□

Contradiction.

7 Surfaces

7.1 Le concept de variété

Definition 30 (Variété)

Une variété topologique de dimension $n \in \mathbb{N}$ est un espace topologique M tel que

1. Chaque point $p \in M$ admet un voisinage homéomorphe à un ouvert de \mathbb{R}^n
2. L'espace topologique M est séparé (de Hausdorff) et admet une base dénombrable d'ouvert

Definition 31 (Surface topologique)

Une surface topologique est une variété de dimension 2.

7.2 Sous-Varietes de \mathbb{R}^n

Rappels :

Definition 32

Si $U \subset \mathbb{R}^n$, on note $C^k(U, \mathbb{R}^n)$ l'ensemble des fonctions $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ qui sont continues et tel que $\forall j = 1, 2, \dots, n$ les derivees partielles

$$\frac{\partial^k}{\partial x^{i_1} \dots \partial x^{i_k}}$$

existent et sont continues.

Definition 33

Un diffeomorphisme de classe C^k entre deux ouverts $U, V \subset \mathbb{R}^n$ est une application $f : U \rightarrow V$ tel que

1. f est bijective
2. f et f^{-1} sont de classe C^k

Definition 34 (Système de coordonnées)

On appelle système de coordonnées (generalisees ou curviligne) sur un ouvert U la donnée de n fonctions

$$y_i : U \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

qui verifient que la fonction $f = (y_1, \dots, y_n)$ est un diffeomorphisme de classe C^k .

Definition 35 (Sous-Variete)

Un sous-ensemble $M \subset \mathbb{R}^n$ est une sous-variete differentiable de classe C^k si $\forall p \in M$, il existe un ouvert $U \subset \mathbb{R}^n$ tel que $p \in U$ et un diffeomorphisme $f : U \rightarrow V \subset \mathbb{R}^n$ tel que $f(M \cap U) = V \cap \mathbb{R}^m$ ou \mathbb{R}^m est plonge dans \mathbb{R}^n .

Autre point de vue :

M est une sous-variete de classe C^k si $\forall p \in M$ il existe un système de coordonnées curvilignes de classe C^k y_1, \dots, y_n definie sur un voisinage U de p tel que $q \in U \cap M \iff y_{m+1}(q) = \dots = y_n(q) = 0$.

On regarde $y_j(x) = 0 (j = m + 1, \dots, n)$ comme un système d'équations locales qui definissent la sous-variete.

Definition 36 (Dimension d'une sous variete)

m tel que defini ci-dessus est la dimension de M et $n - m$ est la codimension de $M \subset \mathbb{R}^n$.

7.2.1 Rappel de calcul differentiel

Definition 37

Une application $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ definie sur un ouvert $U \subset \mathbb{R}^m$ est differentiable (au sens de Frechet) en $p \in U$ s'il existe une application lineaire $l : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ tel que

$$\lim_{|h| \rightarrow 0} \frac{f(p+h) - f(p) - l(h)}{|h|} = 0$$

7.3 Le theoreme du rang constant

Si $A \in M_{n \times m}(K)$ est de rang r alors il existe des matrices inversibles $P \in GL_n(K), Q \in GL_m(K)$ tel que

$$PAQ^{-1} = \begin{pmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Theoreme 36 (Theoreme du rang constant)

La meme chose se produit localement pour une application differentiable, ie. il existe une reparametrisation tel que tout fonction f s'ecrit comme

$$f(x_1, \dots, x_m) = (x_1, \dots, x_r, \dots)$$

Definition 38

On note

$$\text{Rang}(f, p) = \text{Rang}_f(p) = \text{Rang}(df_p)$$

Definition 39 (Rang maximal)

1. f est de rang maximal en p si

$$\text{Rang}_f(p) = \min \{n, m\}$$

2. f est une submersion si $\text{Rang}_f(p) = n \forall p \in U \iff df_p$ est surjective $\forall p$
3. f est une immersion $\iff \text{Rang}_f(p) = m \iff df_p$ est injectif $\forall p \in U$

Lemme 37

Si $f \in C^1(U, \mathbb{R}^n)$ alors la fonction $U \rightarrow \mathbb{N}, p \mapsto \text{Rang}_f(p)$ est semi-continue inferieurement.

Preuve

Si $\text{Rang}_f(p) > \alpha$, alors il existe une sous matrice S_p de la matrice jacobienne de taille $r \times r$ tel que $\det(S_p) \neq 0$ par continuite des $\frac{\partial f_i}{\partial x_i}$ on a $\det S_q \neq 0$ pour q assez proche de $p \Rightarrow \text{Rang}_f(p) \geq r > \alpha$ \square

Theorème 38 (Theoreme du rang constant)

Soit $f \in C^k(U, \mathbb{R}^n)$, ($U \subset \mathbb{R}^m$) avec $k \geq 1$. Supposons que $\text{Rang}_f(p)$ est constant.

Alors pour tout point $p \in U$ il existe des voisinages $V \subset U$ de p et W de $q = f(p)$ est des diffeomorphismes C^k , $\phi : U \rightarrow U'$, $\psi : W \rightarrow W'$ tel que

$$\tilde{f} = \psi \circ f \circ \phi^{-1}$$

satisfait

$$\tilde{f}(x_1, \dots, x_m) = (x_1, \dots, x_r, 0, \dots)$$

Corollaire 39 (Theoreme d'inversion locale)

Si $f \in C^k(U, \mathbb{R}^n)$, $k \geq 1$, $U \subset \mathbb{R}^n$ verifie que $df_p : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ est un isomorphisme, alors il existe des voisinages U de p et V de $q = f(p)$ tel que $df_q^{-1} = (df_q)^{-1}$.