Prof. Luis Florit
Daniel González Casanova Azuela
github.com/danimalabares/rg

Geometria Riemanniana

Índice

1 Aula 1

1.1 Lembrando

Definição ***Variedade diferenciável***

1. M espaço topológico Hausdorff (T^2), base enumerável. Essas duas condições são equivalentes à existência de partições da unidade.
2. M localmente euclídeo, i.e. $\mathcal{A} = \{(\chi_\lambda, U_\lambda)\}$, $\chi_\lambda : U_\lambda \subset M \to \chi_\lambda(U_\lambda) \subset \mathbb{R}^n$, com $M = \bigcup_\lambda U_\lambda$. Dizemos que n é a ***dimensão*** de M.
3. Restringindo dois abertos U_λ, U_μ com $U_\lambda \cap U_\mu \neq \emptyset$, a ***mudança de coordenadas*** $\chi_\mu \circ \chi_\lambda^{-1} : \chi_\lambda(U_\lambda \cap U_\mu) \to \chi_\mu(U_\lambda \cap U_\mu)$ deve ser diferenciável. (Nesse curso diferenciável é C^∞ a menos que especifiquemos).
4. Maximalidade, i.e. $\mathcal{A}$ é maximal.

Definição (Mapa diferenciável) $f : M^n \to N^m$ se para todo ponto com cartas (x, U) de M e (y, V) de N o mapa $y \circ f \circ x^{-1}$ é diferenciável. Denotaremos o conjunto de funções diferenciaveis por $\mathcal{F}(M, N)$. Em particular $\mathcal{F}(M) := \mathcal{F}(M, \mathbb{R})$.

Definição (Espaço tangente) $\mathcal{F}_p(M)$ é o espaço de funções definidas num aberto de p identificando duas delas se coincidem em qualquer aberto contendo p.

$$T_pM := \{v \in \mathcal{F}_p(M)^* : v(fg) = f(p)v(g) + g(p)v(f)\}$$

Pergunta $\mathcal{F}_p(M)$ es el stalk de la gavilla de funciones suaves? Qué pasa si definimos algo como las derivaciones en $\mathcal{F}(U)$.

A la hora de definir base de T_pM con los operadores ∂_i necesitamos fijar una carta, así que en realidad no hay una base canónica de T_pM.

Definição (Diferencial de uma função)

$$df_p : T_pM \to T_{f(p)}N$$

definida para $g \in T_{f(p)}N$ como

$$df_p(v)(g) = v(g \circ f)$$

Observação A regra da cadeia é uma tautologia dessa definição!

Definição (Base canônica do espaço tangente) Definimos

$$\partial_i|_p = \left.\frac{\partial}{\partial x_i}\right|_p \in T_pM$$

como, para $g \in T_pM$,

$$\left.\frac{\partial}{\partial x_i}\right|_p(g) = \frac{\partial(g \circ x^{-1})}{\partial u_i}$$

Exercício Mostre que $\{\partial_1|_p, \ldots, \partial_n|_p\}$ é uma base de T_pM.

Solution. Primeiro note que $\{\partial_i|_p\}$ é linearmente independente. Suponha que

$$\sum a_i \partial_i|_p = 0$$

Then for every function this gives zero, so in particular for coordinate functions $x_i : U \to \mathbb{R}$, so

$$0 = \Big(\sum a_i \partial_i\Big) x_j = \sum a_i \delta_{ij} = a_j \qquad \text{for all } j.$$

Now let's check span $\partial_i|_p = T_pM$. Choose a vector $v \in T_pM$ and let

$$w := v - \sum_i v(x_i)\partial_i|_p.$$

We wish to show that $w = 0$.

Then there's the following trick: a function $g : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ with $g(0) = 0$ can be written $g(t) = th(t)$ for some continuous function h (subexercise: construct h, it's an integral). So if we define $\tilde{g}(t) = g(t) - g(0)$ we can write for any $g : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ (without asking that $g(0) = 0$) just $g(t) = g(0) + th(t)$

Subexercise Mostre que para toda $g : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ existe $h : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ contínua tal que $g(t) = g(0) - th(t)$. **Solution.** Let $m_x : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ be the function that multiplies t times a fixed number x. Notice that, for a fixed x, by fundamental theorem of Calculus

$$\int_0^1 \frac{d}{dt}(g \circ m_x)(t)dt = g(x) - g(0)$$

and also
$$\int_0^1 \frac{d}{dt}(g \circ m_x)(t)dt = \int_0^1 g'(xt) \cdot x = x \int_0^1 g'(xt)dt$$
Then we define
$$h(x) := \int_0^1 g'(xt)dt$$
and immediately we get $g(x) = g(0) - xh(x)$.

Subsubexercise Now do that for $g : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$. I think the correct claim is that there exists $h : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ such that for every $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$ we have $g(\vec{x}) = g(\vec{0}) + \vec{x} \cdot h(\vec{x})$. **Solution.** Now m_x multiplies the vector x times the real number t, it is a function $m_x : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^n$. We get
$$\int_0^1 \frac{d}{dt}(g \circ m_x)(t)dt = g(\vec{x}) - g(\vec{0}).$$
And also
$$\int_0^1 \frac{d}{dt}(g \circ m_x)(t)dt = \int_0^1 \nabla_{t\vec{x}} g \cdot \vec{x}dt = \int_0^1 \sum \frac{\partial}{\partial x_i} g\Big|_{t\vec{x}} x_i dt = \sum x_i \cdot \int_0^1 \frac{\partial g}{\partial x_i}\Big|_{t\vec{x}}.$$
Definimos
$$h(\vec{x}) := \left(\int_0^1 \frac{\partial g}{\partial x_1}\Big|_{t\vec{x}} dt, \dots, \int_0^1 \frac{\partial g}{\partial x_n}\Big|_{t\vec{x}} dt \right)$$

Back to the original exercise... Let's try to use this trick to conclude that $w(g) = 0$ for all $g \in \mathcal{F}_p$. Since it's a local statement I just suppose that g is a function $g : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$. Then there is a function $h : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ such that for every $x \in \mathbb{R}^n$, $g(x) = g(0) + x \cdot h(x)$.

Right so remember that I chose an arbitrary vector $v \in T_pM$ and defined $w = v - \sum v(x_i)\partial_i|_p$. I can see that $w(x_i) = 0$ for all coordinate functions x_i. But also for g as above I get
$$w(g) = w(g(0) + x \cdot h(x)) = w(x \cdot h(x)) = w\left(\sum x_i h_i(x)\right) = \sum w(x_i h_i(x))$$
$$= \sum \cancelto{0}{w(x_i)} h_i(x) + x_i h_i(x)$$
and the second term also vanishes if we suppose that the coordinates of our point, x_i, are all zero. Which makes me think: I think that's the point of the trick, that it somehow manages to put the coordinates of the point inside the whole thing, and then we can suppose the coordinates are 0 and simplify everything. □

Definição (Fibrado tangente) Como os $\mathcal{F}_p(M)$ são disjuntos, porque M é Hausdorff, os espaços tangentes são disjuntos para pontos distintos.
$$TM := \bigsqcup_{p \in M} T_pM$$
com a estrutura diferenciável que você já conhece.

A projeção natural $\pi : TM \to M$ é uma sumersão no sentido da seguinte definição. (Exercício?)

Definição (Imersão e sumersão)

1. Imersão se para todo $p \in M$, df_p é injetiva (e isso implica que $n \leqslant m$).
2. ***Sumersão*** de df_p é sobrejetiva para todo p, implicaq ue $n \geqslant m$.
3. ***Difeomorfismo local*** se para todo ponto df_p é um isomorfismo. Isso é equivalente a que para todo ponto existe um aberto tal que $f|_U : U \to V$ é um difemorfismo (teo. função inversa). (Checar.)

Note que $f : M \to N$ contínua é como dizer que a topologia induzida por f, $\tau_f \subset \tau_M$. Mas a igualdade nem sempre tem (e.g. figura 8). f é um ***mergulho*** se $\tau_f = \tau_M$. Isso é equivalente a que $f(M) \subset N$ seja uma subvariedade e $f : M \overset{\text{difeo}}{\simeq} f(M) \subset N$.

Definição (Campo coordenado) Numa vizinhança U de p,

$$\begin{aligned} \partial : U &\longrightarrow TU \subset TM \\ p &\longmapsto \left.\frac{\partial}{\partial x_i}\right|_p \in T_pM \end{aligned}$$

Observação Podemos quase extender esse campo. Num aberto $V \subset U$ cujo fecho $\bar{V} \subset U$. Pega a coberta $\{M \backslash \bar{V}, U\}$. Então existe part. unidade (ξ, φ). Por definição, $\varphi|_V = 1$. Defina $x = \varphi \partial_i$.

Definição (Fibrado vetorial) Um ***fibrado vetorial*** E^k sobre M^n de posto $k \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ é

1. $\pi : E \to M^n$ submersão sobrejetiva.
2. $\forall p \in M$, $E_p = \pi^{-1}(p)$ é um $\mathbb{R}$-e.v. de dimensão k.
3. $\forall p \in M$, existe $p \in U \subset M$ y φ_U tal que
   (a) $\varphi_U : \pi^{-1}(U) \overset{\text{dif}}{\simeq} U \times \mathbb{R}^k$.
   (b) φ_U conmuta con la proyección, i.e.

$$\begin{tikzcd} \pi^{-1}(U) \arrow[r, "\varphi_U"] \arrow[d, "\pi"'] & U \times \mathbb{R}^k \arrow[dl, "\pi_1"] \\ U & \end{tikzcd}$$

   (c) $\forall q \in U$, $\varphi|_{E_q} : E_q \to \{q\} \times \mathbb{R}^k \cong \mathbb{R}^k$ é um isomorfismo linear.

   Isso é equivalente a pedir que exista um ***atlas trivializante*** de E. É $\{(\varphi, \underbrace{\pi(U)}_{\subseteq E} : U \in \Lambda \subset \tau_M\}$ es decir una familia de abiertos en E indexada por una familia de abiertos de M. Considere dos de estos abiertos con $W := U \cap V \neq \varnothing$.

$$\begin{array}{ccc} \varphi_U|_{\pi(W)}\pi^{-1}(W) & \longrightarrow & W \times \mathbb{R}^k \\ & & \downarrow \\ \varphi_V|_{\pi^{-1}(W)}\pi^{-1}(W) & \longrightarrow & W \subset \mathbb{R}^k \end{array}$$

onde estamos parametrizando numa variedade! Ou seja, implícitamente estamos pegando cartas nela, mas podemos deixá-lo assim.

Temos as funções de transição

$$\varphi_{VU} = \varphi_V \circ \varphi_U^{-1}|_{W \times \mathbb{R}^k} : W \times \mathbb{R}^k \to W \times \mathbb{R}^k$$

que realmente estão determinadas por a parte linear:

$$\varphi_{VU}(Q, v) = (Q, \xi_{VU}(Q)(v)$$

onde

$$\xi_{VU} : W \to \mathsf{GL}(k, \mathbb{R})$$

e são chamadas de ***funções de transição*** de E. Elas satisfacem

$$\xi_{VU} \circ \xi_{SV} = \xi_{SU} \qquad \text{cocycle condition}$$

$$\text{no seria}\ldots \qquad \xi_{VU} \circ \xi_{US} = \xi_{VS}$$

Então podemos formar um fibrado vetorial a partir das funções de transição só.

2 Exercícios de do Carmo

2.1 Capítulo 0

Exercise 2 Prove que o fibrado tangente de uma variedade diferenciável M é orientável (mesmo que M não seja).

Solution. Es porque la diferencial de los cambios de coordenadas está dada por la identidad y una matriz lineal. Sí, porque por definición las trivializaciones locales de TM preservan la primera coordenada **y** son isomorfismos lineales en la parte del espacio vectorial. Entonces queda que

$$d(\varphi_U \circ \varphi_V^{-1}) = \left(\begin{array}{c|c} \mathrm{Id} & 0 \\ \hline 0 & \xi \in \mathsf{GL}(n) \end{array}\right)$$

pero no estoy seguro de por qué ξ preservaría orientación, i.e. que tenga determinante positivo... a menos de que... $\square$

2.2 Capítulo 1

Exercise 1 Prove que a aplicação antípoda $A : S^n \to S^n$ dada por $A(p) = -p$ é uma isometria de S^n. Use este fato para introduzir uma métrica Riemanniana no espaço projetivo real $\mathbb{R}P^n$ tal que a projeção natural $\pi : S^n \to \mathbb{R}P^n$ seja uma isometria local.

Solution. Lembre que a métrica de S^n é a induzida pela métrica euclidiana, onde pensamos que $T_pS^n \hookrightarrow T_p\mathbb{R}^{n+1}$. É claro que A é uma isometría de $\mathbb{R}^n$, pois ela é a sua derivada (pois ela é linear), de forma que $\langle v, w\rangle_p = \langle -v, -w\rangle_{A(p)} = \langle v, w\rangle_{-p}$.

É um fato geral que se as transformações de coberta preservam a métrica, obtemos uma métrica no quociente de maneira natural, i.e. para dois vetores $v, w \in T_p\mathbb{R}P^n$ definimos $\langle v, w\rangle_p^{\mathbb{R}P^n} := \langle \tilde{v}, \tilde{w}\rangle_{\tilde{p}\in\pi^{-1}(p)}$.

Para ver que a projeção natural é uma isometria local basta ver que a diferencial de A é um isomorfismo em cada ponto. Mas como ela é $-A$, isso é claro. $\square$

3 Aula 2

Definição Um ***fibrado vetorial*** é uma submersão sobrejetora

$$\pi : E \to M$$

onde π é a ***projeção***, E o ***espaço total*** e M a ***base***. Satisfazendo

1. E possui um ***atlas trivializante***, i.e. para todo $p \in M$ existe $U \ni p$ aberto e carta

   $$\varphi : \pi^{-1}(U) \overset{\text{difeo}}{\to} U \times \mathbb{R}^k$$

   tal que

   - $\pi \circ \varphi_U = \pi|_{\pi^{-1}(U)}$
   - Se $W = U \cap V \neq \varnothing$,

     $$\begin{aligned} \varphi_V \circ \varphi_U^{-1}|_{W\times\mathbb{R}^k} : W \times \mathbb{R}^k &\longrightarrow W \times \mathbb{R}^k \\ (p, v) &\longmapsto (p, \xi_W(p)(v)) \end{aligned}$$

     onde pedimos que $\xi_{VU} : W \to \mathsf{GL}(k, \mathbb{R})$, e chamamos esas funções de ***funções de transição*** de E.

Note que as fibras são espaços vetoriais: para $Q \in U$, $E_Q \overset{\text{def}}{=} \pi^{-1}(Q) \subset E$. Pegue dois elementos $x, y \in E_Q$. Definimos a soma deles a traves de

$$\varphi(x + y) = (Q, \bar{\varphi}(x) + \bar{\varphi}(y)) = (Q, \bar{\varphi}(x + y))$$

onde $\bar{\varphi}$ é a parte "linear". Note que isso faz automaticamente que as trivializações sejam lineares nas fibras, i.e. $E_p \to \{p\} \times \mathbb{R}^k$ linear.

Definição As ***seções de*** E são

$$\Gamma(E) = \left\{ \begin{tikzcd} \lambda : M \arrow[r] \arrow[dr, "\mathrm{id}"] & E \arrow[d] \\ & M \end{tikzcd} \right\}$$

Pergunta Existe uma coleção de k seções que são uma base de T_pM em cada ponto? Não.

Observação Existe uma base de seções iff $E \cong M \times \mathbb{R}^k$. Mas isso ainda nem tem sentido...

Definição Um ***mapa de fibrados*** é

$$\begin{tikzcd} F : E \arrow[r] \arrow[d, "\pi"] & E \arrow[d, "\pi'"] \\ M \arrow[r, "f"] & M' \end{tikzcd}$$

que é linear nas fibras, i.e.

$$F|_{E_Q} : E_Q \to E'_{f(Q)}.$$

F é um ***isomorfismo*** de fibrados vetoriais iff F é um difeomorfismo e um mapa de fibrados. (Obviamente isso implica que a inversa é um mapa de fibrados.)

Observação Todo fibrado vetorial possui uma base *local* de seções. Porque pego uma base em $U \times \mathbb{R}^k$ numa trivialização local e pusho ela pra $\pi^{-1}(U)$.

Exemplo (Fibrado dual) A observação anterior nos da um jeito super simples de construir o fibrado dual: para cada trivializacão local, e para cada ponto definimos a base dual do espaço vetorial original no ponto, e é isso, tudo segue.

Outros exemplos podem ser construidos do mesmo jeito: $\mathrm{End}(E)$, $\Lambda^r(\mathbb{V})$. A ideia e que "a álgebra linear pode ser fibralizada por causa de que temos bases locais".

Exemplo

Outro exemplo, embora não é um fibrado vetorial, é o conjunto de orientações de $\mathbb{V}$, $\mathcal{O}(\mathbb{V}) := \{\text{bases de } \mathbb{V}\}\big/ \sim$. Definimos um ***fibrado orientável*** se $\mathcal{O}(E)$ tem uma seção global. Isso se traduz a que em cada ponto exista uma carta tal que a orientaçao.. seja compatível?

Também podemos definir M ***orientável*** se TM orientavel *como fibrado*. TM sempre é orientavel *como variedade* porque TTM é orientável *como fibrado*.

Exemplo (Tensores=aplicações multilineares) Pega $\mathbb{V}$ esp. vect e considere os tensores $\{T : \mathbb{V} \times \ldots \times \mathbb{V} \to \mathbb{R}\} := \mathrm{Multi}(E)$. As seções disso são $\mathfrak{X}^r(E)$. No caso do fibrado tangente se denotam $T \in \mathfrak{X}^r(M) \overset{\text{def}}{=} \Gamma TM$, e se chamam ***campos tensoriais***.

3.0.1 Tensores

A ver la notación es que $T \in \mathfrak{X}^r$

Upshot (del ejercicio) Que es lo mismo pensar en un operador que come campos vectoriales y da funciones, o un campo, una cosa que en cada punto me da un operador que come vectores.

Siguiente cosa (A dupla personalidade dos campos vetoriais) Que podemos pensar que los campos vectoriales son derivaciones. $\hat{X} : \mathcal{F}(M) \to \mathcal{F}(M)$. Sí porque un campo de vectores en un punto puede ser evaluado en una función y da un número, y bueno satisface Leibniz.

Va otra construcción:

E, pega $\Lambda^r(E)$, os mapas r-alternantes de E, que é um fibrado vetorial. As seções dele, $\Gamma(\Lambda^r E)$. No caso do fibrado tangente, $\Omega^r(M) := \Lambda^r(TM)$. Entonces a ver de nuevo: pega $\omega \in \Lambda^r TM$. En cada punto me da una aplicación e-multiniear alternante, pero también lo puedo ver como un mapa $\omega : \mathfrak{X}M \times .. \times \mathfrak{X}M \to \mathcal{F}M$.

Exercício M^n é orientável $\iff$ $\Lambda^n M$ possui seção nunca nula.

Lembre que $\Omega^n_c(M)$ é o espaço de formas cujo suporte tem fecho compacto.

Observação M orientada $\implies$ integral está bem definida. Sim, porque o teorema de mudança de variáveis diz que para $\varphi : U \to V$, $\omega \in \Omega^n(V)$, $\int_U \varphi^*\omega =$ *sinal!* $\int_V \omega$. Então para que não se faça uma bagunça precisamos que os determinantes das mudanças de coordenadas coincidam.

Definição (Fibrado pullback)

$$\begin{tikzcd} f^*(E) \arrow[r, "\pi_2"] \arrow[d, "\pi_1"'] & E \arrow[d, "\pi"] \\ M \arrow[r, "f"'] & N \end{tikzcd}$$

onde

$$f^*(E) = \{(p, v) \in M \times E : \pi(v) = f(p)\}$$

(Note que botamos o p em (p, v) para obter que o espaço total de $f^*(E)$ seja uma coleção *disjunta* de fibras.)

Essa é uma definição ótima. Note que π_2 é um mapa de fibrados que aparece de graça. (Não é um isomorfismo.)

Observação O pullback é mágico porque ele leva todas as propriedades de E como curvatura, conexão, etc.

Observação Se f é constante obtemos o fibrado trivial.

Observação Pega $\xi\Gamma(f^*E)$. Então temos para $p \in M$ um elemento $\xi(p) = (p, \bar{\xi}(p))$. Então olha

$$\begin{tikzcd} \bar{\xi} : M \arrow[r] \arrow[dr, "f"] & R \arrow[d, "\pi"] \\ & N \end{tikzcd}$$

então essas seçnes se chaman de $\mathfrak{X}_f \cong \Gamma(f^*(E))$ ***seções ao longo de*** f.

Entonces el punto es que, por construcción cada sección del pullback me da un elemento en el otro vb y de ahi quiero que la proyección me devuelva f.

Definição Dos campos $X \in \mathfrak{X}(M)$ e $Y \in \mathfrak{X}(N)$ están f-***relacionados*** $X \overset{f}{\sim} Y$ se $Y \circ f = f_* X$ donde $f : M \to N$. Pero pérame porque a mí me habían dicho que no siempre $f_* X$ está bien definido. Ah, porque aquí $f_* X$ es un campo *ao longo de* f; así *siempre* está bien definido. Entonces tiene sentido la definición y el ejercicio:

Exercício $X_1 \overset{f}{\sim} X_2 \implies [X_1, X_2] \overset{f}{\sim} [Y_1, Y_2]$ **Hint.** Pensa que um campo é uma coisa que pega uma função e me da uma função.

3.1 Grupos de Lie

Definição Um ***grupo de Lie*** é um grupo G que é uma variedade diferenciável tal que

$$\cdot : G \times G \to G \qquad\qquad {}^{-1} : G \to G$$

são diferenciaveis.

Os grupos de Lie tem um monte de difeomorfismos dados pela multiplicacão a esquerda: $h \in G \rightsquigarrow L_h : G \to G$, $L_h(g) = h \cdot g$. Como $L_{h^{-1}} \circ L_h = \mathrm{Id}$, $L_h \in \mathrm{Dif}\, G$.

Exercício $v \in T_e G$, $X_v(g) = d(L_g)_e(v) \in T_g G$, $\implies X_v \in \mathfrak{X}(G)$. **Note** que vai precisar usar que o produto do grupo é diferenciável.

E aí fica que uma base $\{v_i\} \subset T_e G$ nos da uma base global de seções. Em outras palavras, o fibrado tangente de um grupo de Lie é trivial. Isso é rarísimo, uma variedade com fibrado tangente trivial, se chama variedade paralelizável.

Observação $\forall g \in G, X_v \overset{L_g}{\sim} X_v$ para todo $v \in T_e G$. Conta:

tu pode

Mas ainda, se ele está L_g relacionado com ele mesmo para todo $g \in G$ (isso se chama ser ***invariante a esqueda***), então ele é um X_v para algum v. Conta:

pode

Então ai fica essa equivalência, e ademais, se pegamos $v, w \in T_e G$ podemos pensar em X_v, X_w, e *definimos* $X_{[v,w]} := [X_v, X_w]$. E ai obtemos a ***álgebra de Lie*** de G, que é $(T_e G, [,]) := \mathfrak{g}$.

Mais um Pegue $X \in \mathfrak{g}$ e γ curva integral de X pasando por e, diagmos $\gamma(0) = e$. Prove que

1. Se φ_t é o fluxo de $X \implies L_g \circ \varphi_t = \varphi_t \circ L_g$, $\varphi_t = R_{\gamma(t)}$.
2. γ é homomorfismo de grupos $\mathbb{R} \to G$. Isso permete definir $\exp^G : \mathfrak{g} \to G$ dada por $\exp^G(X) = \gamma(1)$. Prove que $\exp^G(tX) = \gamma(t)$.

   Hint. O último implica os outros.