模擬授業（20 分）

東京理科大学理学研究科　小林 穂乃香

山口大学面接 於
2022 年 9 月 5 日

1. ユークリッド幾何学とリーマン幾何学

今まで習ってきた幾何学は，全てユークリッド幾何学

$\cdots$ “$\underbrace{\text{真っ直ぐな物差し}}_{\text{(ユークリッド計量)}}$” が定義された真っ直ぐな空間

今まで習ってきた幾何学は，全てユークリッド幾何学

$\cdots$ “$\underbrace{\text{真っ直ぐな物差し}}_{\text{(ユークリッド計量)}}$” が定義された真っ直ぐな空間

- $X = (X_1, \ldots, X_n),\ Y = (Y_1, \ldots, Y_n) \in \mathbb{R}^n$,

  $\langle\ ,\ \rangle$: $\mathbb{R}^n$ 上のユークリッド計量 $\overset{\text{def}}{\Leftrightarrow}$ $\langle X, Y\rangle = \sum_{i=1}^n X_i Y_i$

- $(\mathbb{R}^n, \langle\ ,\ \rangle)$ をユークリッド空間という

1. ユークリッド幾何学とリーマン幾何学

今まで習ってきた幾何学は，全てユークリッド幾何学

$\cdots$ “$\underbrace{\text{真っ直ぐな物差し}}_{\text{(ユークリッド計量)}}$” が定義された真っ直ぐな空間

- $X = (X_1, \ldots, X_n),\ Y = (Y_1, \ldots, Y_n) \ \in \mathbb{R}^n$,

  $\langle\, , \rangle : \mathbb{R}^n$ 上のユークリッド計量 $\overset{\text{def}}{\Leftrightarrow} \quad \langle X, Y \rangle = \sum_{i=1}^{n} X_i Y_i$

- $(\mathbb{R}^n, \langle\, , \rangle)$ をユークリッド空間という

リーマン幾何学では，空間や計量が真っ直ぐとは限らない

$\cdots$ リーマン多様体とは，リーマン計量が定義された多様体のこと

1. ユークリッド幾何学とリーマン幾何学

M ：C^∞ 多様体

T_pM : 点 $p \in M$ における M の接空間

$X, Y \in T_pM$

- $g : T_pM \times T_pM \to \mathbb{R}$

  g : M 上のリーマン計量 $\overset{\text{def}}{\Leftrightarrow}$
  - (i) g : 双線型
  - (ii) $g(X, Y) = g(Y, X)$（対称）
  - (iii) $g(X, X) \geq 0$ かつ $g(X, X) = 0 \Leftrightarrow X = 0$（正定値）

- このとき，組 (M, g) をリーマン多様体という

1. ユークリッド幾何学とリーマン幾何学

M ：C^∞ 多様体

T_pM：点 $p \in M$ における M の接空間

$X, Y \in T_pM$

- $g : T_pM \times T_pM \to \mathbb{R}$

  g : M 上のリーマン計量 $\overset{\text{def}}{\Leftrightarrow}$
  (i) g : 双線型
  (ii) $g(X,Y) = g(Y,X)$（対称）
  (iii) $g(X,X) \geq 0$ かつ
  $g(X,X) = 0 \Leftrightarrow X = 0$（正定値）

- このとき，組 (M, g) をリーマン多様体という

$\mathbb{R}^n$ は C^∞ 多様体であり，ユークリッド計量はリーマン計量である

⟹ ユークリッド空間 $(\mathbb{R}^n, \langle\, ,\, \rangle)$ はリーマン多様体のひとつ

2. なぜ曲がった空間を考えるのか

例 1.　東京–ニューデリー間の最短距離は？

2. なぜ曲がった空間を考えるのか

例 2.　重力場における光の軌跡

例 2.　重力場における光の軌跡

a の位置にある天体が，b 地点から見える（重力レンズ効果）

2. なぜ曲がった空間を考えるのか

例 2.　重力場における光の軌跡

a の位置にある天体が，b 地点から見える（重力レンズ効果）

- 光は常に“真っ直ぐ”進む
- 重力によって歪んだ空間では c_1 が“直線”

2. なぜ曲がった空間を考えるのか

例 2.　重力場における光の軌跡

a の位置にある天体が，b 地点から見える（重力レンズ効果）

- 光は常に“真っ直ぐ”進む
- 重力によって歪んだ空間では c_1 が“直線”
- c_2 が直線に見えるのは，我々は無意識のうちにこの世界をユークリッド空間として見ているから

例 3.　$\mathbb{R}^n$ における非ユークリッド計量

$X = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 \mid x_2 > 0\}$ 上のリーマン計量 g を，次のように定義する：

$$g(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}) := \frac{1}{x_2^2}\langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{w} \rangle \qquad (\boldsymbol{v}, \boldsymbol{w} \in T_pX,\ \ p \in X)$$

例 3．　$\mathbb{R}^n$ における非ユークリッド計量

$X = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 \,|\, x_2 > 0\}$ 上のリーマン計量 g を，次のように定義する：

$$g(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}) := \frac{1}{x_2^2}\langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{w} \rangle \qquad (\boldsymbol{v}, \boldsymbol{w} \in T_pX,\ \ p \in X)$$

問．(X, g) 上の曲線 c_i の長さを求めよ．

$$c_1(t) = (t, 1),\ \ c_2(t) = (t, 2),\ \ c_3(t) = (1, t),\ \ c_4(t) = (1, 2t)$$

例 3.　$\mathbb{R}^n$ における非ユークリッド計量

$X = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 \mid x_2 > 0\}$ 上のリーマン計量 g を，次のように定義する：

$$g(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}) := \frac{1}{x_2^2}\langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{w} \rangle \qquad (\boldsymbol{v}, \boldsymbol{w} \in T_pX,\ \ p \in X)$$

問．(X, g) 上の曲線 c_i の長さを求めよ．

$$c_1(t) = (t, 1),\ \ c_2(t) = (t, 2),\ \ c_3(t) = (1, t),\ \ c_4(t) = (1, 2t)$$

Definition

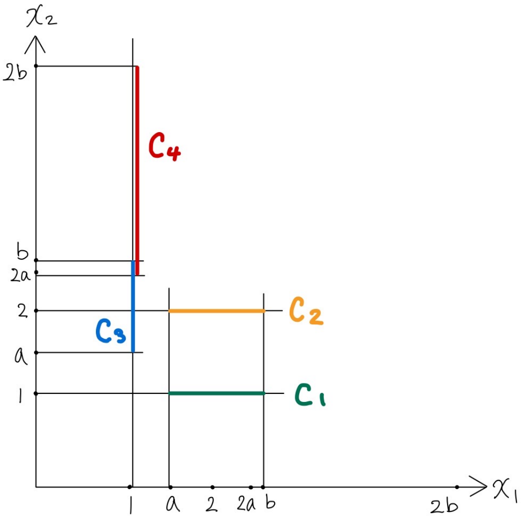
曲線 $c : [a, b] \to (M, g)$ の長さ $L_g(c)$ は次のように定義される：

$$\|\dot{c}(t)\|_g := \sqrt{g(\dot{c}(t), \dot{c}(t))}$$

$$L_g(c) := \int_a^b \|\dot{c}(t)\|_g \, dt$$

2. なぜ曲がった空間を考えるのか

$$c_1(t) = (t, 1), \quad c_2(t) = (t, 2), \quad c_3(t) = (1, t), \quad c_4(t) = (1, 2t)$$

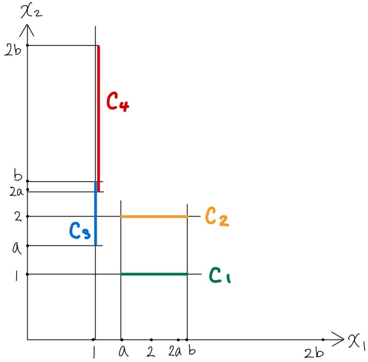


2. なぜ曲がった空間を考えるのか

- $c_1(t) = (t, 1),\ \ \dot{c}_1(t) = (1, 0)$

$$g(\dot{c}_1(t), \dot{c}_1(t)) = \frac{1}{1^2}\langle \dot{c}_1(t), \dot{c}_1(t)\rangle = 1$$

$$\therefore\ L_g(c_1) = \int_a^b dt = \underline{b - a}$$



- $c_1(t) = (t, 1),\ \dot{c}_1(t) = (1, 0)$

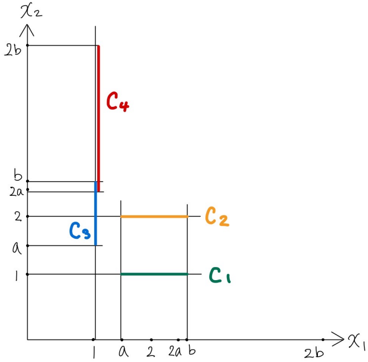
$$g(\dot{c}_1(t), \dot{c}_1(t)) = \frac{1}{1^2}\langle \dot{c}_1(t), \dot{c}_1(t)\rangle = 1$$

$$\therefore\ L_g(c_1) = \int_a^b dt = \underline{b - a}$$

- $c_2(t) = (t, 2),\ \dot{c}_2(t) = (1, 0)$

$$g(\dot{c}_2(t), \dot{c}_2(t)) = \frac{1}{2^2}\langle \dot{c}_2(t), \dot{c}_2(t)\rangle = \frac{1}{2^2}$$

$$\therefore\ L_g(c_2) = \int_a^b \frac{1}{2} dt = \underline{\frac{1}{2}(b - a)}$$



- $c_1(t) = (t, 1), \ \dot{c}_1(t) = (1, 0)$

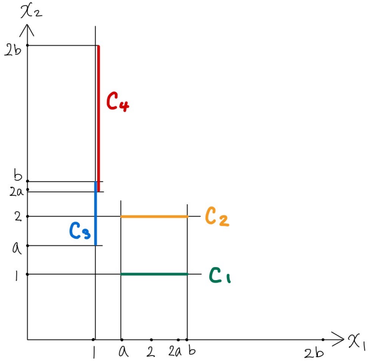
$$g(\dot{c}_1(t), \dot{c}_1(t)) = \frac{1}{1^2}\langle \dot{c}_1(t), \dot{c}_1(t)\rangle = 1$$

$$\therefore \ L_g(c_1) = \int_a^b dt = \underline{b - a}$$

- $c_2(t) = (t, 2), \ \dot{c}_2(t) = (1, 0)$

$$g(\dot{c}_2(t), \dot{c}_2(t)) = \frac{1}{2^2}\langle \dot{c}_2(t), \dot{c}_2(t)\rangle = \frac{1}{2^2}$$

$$\therefore \ L_g(c_2) = \int_a^b \frac{1}{2} dt = \underline{\frac{1}{2}(b - a)}$$



⇒ ユークリッド空間では c_1 と c_2 の長さは同じだが，
(X, g) 上では異なる！

2. なぜ曲がった空間を考えるのか

- $c_3(t) = (1, t),\ \dot{c}_3(t) = (0, 1)$

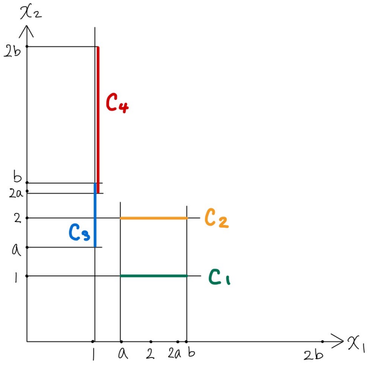
  $g(\dot{c}_3(t), \dot{c}_3(t)) = \dfrac{1}{t^2}$

  $$\therefore\ L_g(c_3) = \int_a^b \frac{1}{t} dt = \underline{\log \frac{b}{a}}$$

- $c_4(t) = (1, 2t),\ \dot{c}_4(t) = (0, 2)$

  $g(\dot{c}_4(t), \dot{c}_4(t)) = \dfrac{1}{t^2}$

  $$\therefore\ L_g(c_4) = \int_a^b \frac{1}{t} dt = \underline{\log \frac{b}{a}}$$



2. なぜ曲がった空間を考えるのか

- $c_3(t) = (1, t),\ \ \dot{c}_3(t) = (0, 1)$

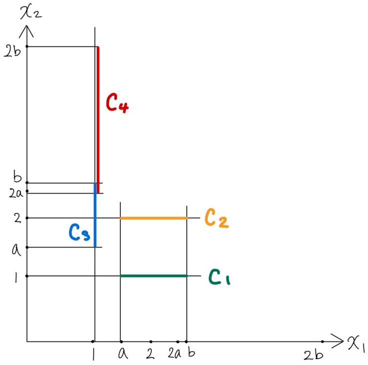
  $$g(\dot{c}_3(t), \dot{c}_3(t)) = \frac{1}{t^2}$$

  $$\therefore\ L_g(c_3) = \int_a^b \frac{1}{t} dt = \underline{\log \frac{b}{a}}$$

- $c_4(t) = (1, 2t),\ \ \dot{c}_4(t) = (0, 2)$

  $$g(\dot{c}_4(t), \dot{c}_4(t)) = \frac{1}{t^2}$$

  $$\therefore\ L_g(c_4) = \int_a^b \frac{1}{t} dt = \underline{\log \frac{b}{a}}$$



⟹ ユークリッド空間では c_3 と c_4 の長さは異なるが，

(X, g) 上では同じ長さ！

3. 曲がった空間における“真っ直ぐ”とは？

ユークリッド空間における直線　…　2 階微分がゼロ

↓ 拡張

リーマン多様体における測地線　…　2 階微分がゼロ

3. 曲がった空間における“真っ直ぐ”とは？

ユークリッド空間における直線 $\cdots$ 2 階微分がゼロ

⬇ 拡張

リーマン多様体における測地線 $\cdots$ 2 階微分がゼロ

まずは，曲がった空間における微分を定義する．

Definition

M : C^∞ 多様体

TM : M の接束

$\nabla : TM \times TM \to TM$: M の接続 $\overset{\text{def}}{\Longleftrightarrow}$

(i) $\nabla_{fX+Y} Z = f \nabla_X Z + \nabla_Y Z$

(ii) $\nabla_X (aY + Z) = a \nabla_X Y + \nabla_X Z$

(iii) $\nabla_X (fY) = X(f) Y + f \nabla_X Y$

ここで，$X, Y, Z \in TM$, $f \in C^\infty(M)$, $a \in \mathbb{R}$.

$\nabla_X Y$ を，X についての Y の共変微分という．

3. 曲がった空間における“真っ直ぐ”とは？

Theorem

リーマン多様体 (M, g) に対して，次を満たすような接続 ∇ は唯一定まる：

$$\begin{aligned} &\textit{(iv)} \quad [X, Y] = \nabla_X Y - \nabla_Y X \\ &\textit{(v)} \quad Xg(Y, Z) = g(\nabla_X Y, Z) + g(Y, \nabla_X Z) \end{aligned}$$

ここで，$X,\ Y,\ Z \in TM$.

(i)〜*(v)* を満たす接続 ∇ を，M の *Levi-Civita* 接続という．

Definition

$c : (M, g, \nabla)$ 上の C^∞ 曲線

$$c : M \text{ 上の測地線} \quad \overset{\text{def}}{\Longleftrightarrow} \quad \nabla_{\dot{c}} \dot{c} = 0$$

3. 曲がった空間における“真っ直ぐ”とは？

実際に $\nabla_{\dot{c}}\dot{c}$ を計算するために，いくつか準備をする．

Definition

(M, g, ∇) : n 次元リーマン多様体，$(x_1, \ldots, x_n)$: M の座標

$\partial_i := \partial/\partial x_i$ とする．

$$\nabla_{\partial_i}\partial_j = \sum_{k=1}^{n} \Gamma_{ij}^k \partial_k$$

によって定義される Γ_{ij}^k を，∇ の接続係数という．

Proposition

(M, g, ∇) がユークリッド空間のとき，$\Gamma_{ij}^k = 0$

3. 曲がった空間における“真っ直ぐ”とは？

Proposition

(M, g, ∇) : n 次元リーマン多様体，$(x_1, \ldots, x_n)$: M の座標

$c : [a, b] \to M$: M 上の C^∞ 曲線

とする．このとき，

$$\nabla_{\dot{c}}\dot{c} = \sum_{k=1}^{n} \left(\frac{d^2(x_k \circ c)}{dt^2} + \sum_{i,j=1}^{n} \Gamma_{ij}^{k} \frac{d(x_i \circ c)}{dt} \frac{d(x_j \circ c)}{dt} \right) \frac{\partial}{\partial x_i}$$

ここで，$x_i \circ c$ は c の第 i 成分．

Corollary

(M, g, ∇) がユークリッド空間のとき，$\Gamma_{ij}^{k} = 0$

$$\begin{aligned} \therefore \quad \nabla_{\dot{c}}\dot{c} = 0 \quad &\Leftrightarrow \quad \frac{d^2(x_k \circ c)}{dt^2} = 0 \\ &\Leftrightarrow \quad c(t) = at + b \quad (a, b \in \mathbb{R}) \end{aligned}$$

Corollary

$M \subset \mathbb{R}^n$ のとき

$$(\nabla_{\dot{c}}\dot{c})_t = \mathrm{pr}_{(T c(t))}\left(\frac{d^2 c}{dt^2}\right)$$

ここで，$\mathrm{pr}_{(T c(t))}$ は $c(t)$ の接空間 $T_{c(t)}M$ への直交射影．

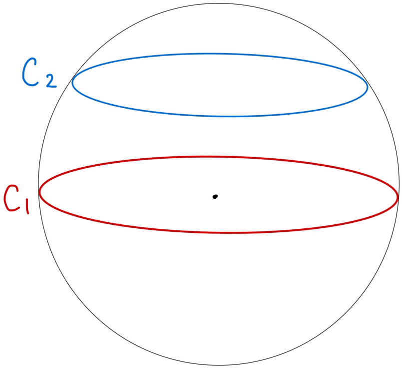
4. 球面における測地線

$S^2 \subset \mathbb{R}^3$ を考える.

問.

- $c_1(t) = (\cos t, \sin t, 0)$
- $c_2(t) = (\frac{1}{\sqrt{2}}\cos t, \frac{1}{\sqrt{2}}\sin t, \frac{1}{\sqrt{2}})$

c_1, c_2 は S^2 の測地線か？



4. 球面における測地線

Proposition

$S^n \subset \mathbb{R}^{n+1}$ の場合，

$$\text{点 } c(t) \text{ における } S^n \text{ の単位法ベクトル } N_{c(t)} \quad = \quad \text{位置ベクトル } c(t)$$

Proposition

$S^n \subset \mathbb{R}^{n+1}$ の場合，

点 $c(t)$ における S^n の単位法ベクトル $N_{c(t)}$ $=$ 位置ベクトル $c(t)$

- $\underline{c_1(t) = (\cos t, \sin t, 0)}$

$$\begin{aligned} (\nabla_{\dot{c}_1}\dot{c}_1)_t &= \mathrm{pr}_{(Tc_1(t))}\left(\frac{d^2c_1}{dt^2}\right) \\ &= \mathrm{pr}_{(Tc_1(t))}(-\cos t, -\sin t, 0) \\ N_{c_1(t)} &= c_1(t) \\ &= (\cos t, \sin t, 0) \end{aligned}$$

$$\therefore\ (\nabla_{\dot{c}_1}\dot{c}_1)_t = \mathrm{pr}_{(Tc_1(t))}(-N_{c_1(t)}) = 0$$

$\therefore$ c_1 は S^2 の測地線

4. 球面における測地線

Proposition

$S^n \subset \mathbb{R}^{n+1}$ の場合，

点 $c(t)$ における S^n の単位法ベクトル $N_{c(t)} \quad = \quad$ 位置ベクトル $c(t)$

- $\underline{c_1(t) = (\cos t, \sin t, 0)}$

$$\begin{aligned}
(\nabla_{\dot{c}_1}\dot{c}_1)_t &= \mathrm{pr}_{(Tc_1(t))}\left(\frac{d^2c_1}{dt^2}\right) \\
&= \mathrm{pr}_{(Tc_1(t))}(-\cos t, -\sin t, 0) \\
N_{c_1(t)} &= c_1(t) \\
&= (\cos t, \sin t, 0)
\end{aligned}$$

$$\therefore\ (\nabla_{\dot{c}_1}\dot{c}_1)_t = \mathrm{pr}_{(Tc_1(t))}(-N_{c_1(t)}) = 0$$

$\therefore\ c_1$ は S^2 の測地線

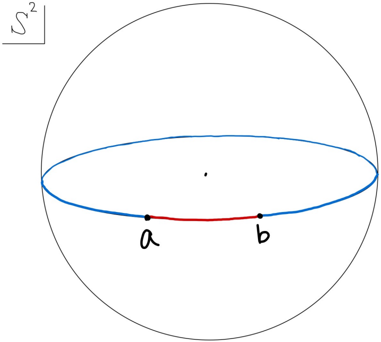
- $\underline{c_2(t) = (\frac{1}{\sqrt{2}}\cos t, \frac{1}{\sqrt{2}}\sin t, \frac{1}{\sqrt{2}})}$

$$\begin{aligned}
&(\nabla_{\dot{c}_2}\dot{c}_2)_t \\
&\quad = \mathrm{pr}_{(Tc_2(t))}((-\frac{1}{\sqrt{2}}\cos t, -\frac{1}{\sqrt{2}}\sin t, 0)) \\
&N_{c_2(t)} = c_2(t) \\
&\qquad = (\frac{1}{\sqrt{2}}\cos t, \frac{1}{\sqrt{2}}\sin t, \frac{1}{\sqrt{2}})
\end{aligned}$$

$$\therefore\ (\nabla_{\dot{c}_2}\dot{c}_2)_t \neq \mathrm{pr}_{(Tc_2(t))}(-N_{c_2(t)}) = 0$$

$\therefore\ c_2$ は S^2 の測地線でない．

注.



a と b を結ぶ測地線は２つある.

リーマン多様体において,

２点間を結ぶ曲線で長さが最短であるもの $\Rightarrow$ 測地線

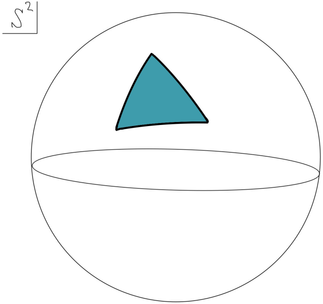
$\not\Leftarrow$

一般に言えない！

4. 球面における測地線

球面における三角形

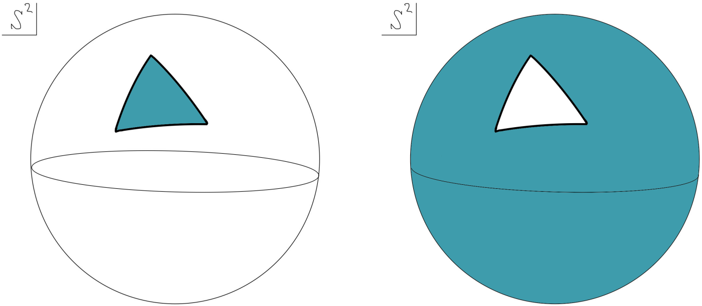
三角形 $\overset{\text{def}}{\Leftrightarrow}$ 3 つの測地線によって囲まれたコンパクト閉領域



4. 球面における測地線

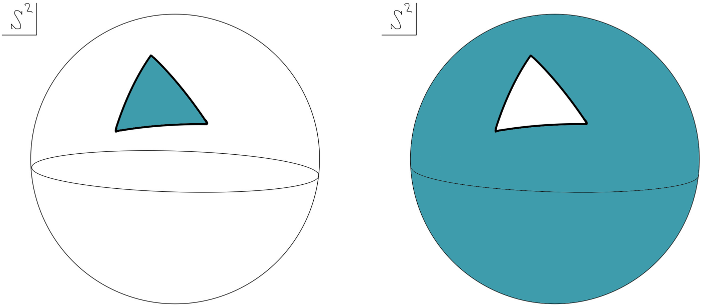
球面における三角形

三角形 $\overset{\text{def}}{\Leftrightarrow}$ 3 つの測地線によって囲まれたコンパクト閉領域



球面における三角形

三角形 $\overset{\text{def}}{\Longleftrightarrow}$ 3 つの測地線によって囲まれたコンパクト閉領域



また，リーマン多様体では，三角形の内角の和が 180° とは限らない！