

幾何学概論第二 (MTH.B212)

4: Gauss の公式 (補足)

山田光太郎

kotaro@math.titech.ac.jp

www.math.titech.ac.jp/~kotaro/class/2020/geom-2/

東京工業大学理学院数学系

2021 年 01 月 07 日

問題 4-1

$$\begin{cases} p_{uu} = \Gamma_{11}^1 p_u + \Gamma_{11}^2 p_v + L\nu, \\ p_{uv} = \Gamma_{12}^1 p_u + \Gamma_{12}^2 p_v + M\nu, \\ p_{vv} = \Gamma_{22}^1 p_u + \Gamma_{22}^2 p_v + N\nu. \end{cases} \quad (\text{Gauss の公式})$$

$$\begin{cases} \nu_u = -A_1^1 p_u - A_2^1 p_v, \\ \nu_v = -A_1^2 p_u - A_2^2 p_v. \end{cases} \quad (\text{Weingarten の公式})$$

- ▶ Γ_{ij}^k : Christoffel 記号 (第一基本量で書ける)
- ▶ Weingarten 行列

$$A = \hat{I}^{-1} \hat{\Pi} = \begin{pmatrix} A_1^1 & A_2^1 \\ A_1^2 & A_2^2 \end{pmatrix}$$

問題 4-1

問題

曲面 $p: U \rightarrow \mathbb{R}^3$ の単位法線ベクトル場を $\nu(u, v)$ とする. 曲面の第一基本形式, 第二基本形式が

$$ds^2 = du^2 + 2 \cos \theta du dv + dv^2, \quad \Pi = 2 \sin \theta du dv$$

と書けているとき, Gauss, Weingarten の公式の適合条件を θ を用いて表しなさい.

$\theta = \theta(u, v)$: 区間 $(0, \pi)$ に値をとる C^∞ -級関数.

- ▶ 漸近 Chebyshev 網 (問題 2-1, 第 3 回講義の映写資料 2 参照).
- ▶ $K = -1$

問題 4-1

Q

1. 定理 4.7 の Ω, Λ 内の $-A_1^2$ と $-A_2^1$ が逆では? いいえ
2. $A = (A_i^j)$ の A_i^j は A の (i, j) 成分ですか? (j, i) 成分です.
3. クリストフェル記号の添字にはどのような意味がありますか?
4. Christoffel 記号は 3 階のテンソルですか? いいえ

▶ パラメータ (u, v) を (u^1, u^2) と書く.

▶ u^j に関する微分を下付きの j で表す: $p_j = p_{uj}, p_{jk} - p_{kj}$

$$[p_{jk}]^T = \sum_{l=1}^2 \Gamma_{jk}^l p_l, \quad \nu_j = - \sum_{l=1}^2 A_j^l p_l$$

幾何学概論第二

4: Gauss の公式 (補足)

2021/01/07 3 / 17

幾何学概論第二

4: Gauss の公式 (補足)

2021/01/07 4 / 17

問題 4-1

$$E = G = 1, F = \cos \theta \text{ から } \hat{I} = \begin{pmatrix} 1 & \cos \theta \\ \cos \theta & 1 \end{pmatrix},$$

$$0 = E_u = (p_u \cdot p_u)_u = 2p_u \cdot p_{uu}, \quad 0 = E_v = 2p_u \cdot p_{uv}$$

$$0 = G_u = (p_v \cdot p_v)_u = 2p_u \cdot p_{uv}, \quad 0 = G_v = 2p_v \cdot p_{vv}$$

$$-\theta_u \sin \theta = F_u = p_{uu} \cdot p_v + p_u \cdot p_{uv} = p_v \cdot p_{uv}$$

$$-\theta_v \sin \theta = F_v = p_{uv} \cdot p_v + p_u \cdot p_{vv} = p_u \cdot p_{vv}$$

$$\begin{pmatrix} p_u \\ p_v \end{pmatrix} (p_{uu}, p_{uv}, p_{vv}) = \begin{pmatrix} p_u \cdot p_{uu} & p_u \cdot p_{uv} & p_u \cdot p_{vv} \\ p_v \cdot p_{uu} & p_v \cdot p_{uv} & p_v \cdot p_{vv} \end{pmatrix} = -\sin \theta \begin{pmatrix} 0 & 0 & \theta_v \\ \theta_u & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} p_u \\ p_v \end{pmatrix} (p_{uu}, p_{uv}, p_{vv}) = \begin{pmatrix} p_u \\ p_v \end{pmatrix} ([p_{uu}]^T, [p_{uv}]^T, [p_{vv}]^T)$$

$$= \begin{pmatrix} p_u \\ p_v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Gamma_{11}^1 & \Gamma_{12}^1 & \Gamma_{22}^1 \\ \Gamma_{11}^2 & \Gamma_{12}^2 & \Gamma_{22}^2 \end{pmatrix} = \hat{I} \begin{pmatrix} \Gamma_{11}^1 & \Gamma_{12}^1 & \Gamma_{22}^1 \\ \Gamma_{11}^2 & \Gamma_{12}^2 & \Gamma_{22}^2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \Gamma_{11}^1 & \Gamma_{12}^1 & \Gamma_{22}^1 \\ \Gamma_{11}^2 & \Gamma_{12}^2 & \Gamma_{22}^2 \end{pmatrix} = \frac{-\sin \theta}{1 - \cos^2 \theta} \begin{pmatrix} 1 & -\cos \theta \\ -\cos \theta & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & \theta_v \\ \theta_u & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

問題 4-1

$$\begin{pmatrix} \Gamma_{11}^1 & \Gamma_{12}^1 & \Gamma_{22}^1 \\ \Gamma_{11}^2 & \Gamma_{12}^2 & \Gamma_{22}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\csc \theta & \cot \theta \\ \cot \theta & -\csc \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & \theta_v \\ \theta_u & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \theta_u \cot \theta & 0 & -\theta_v \csc \theta \\ -\theta_u \csc \theta & 0 & \theta_v \cot \theta \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_1^1 & A_2^1 \\ A_1^2 & A_2^2 \end{pmatrix} = \hat{I}^{-1} \hat{\Pi} = \begin{pmatrix} \csc \theta & -\cot \theta \\ -\cot \theta & \csc \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -\cot \theta & \csc \theta \\ \csc \theta & -\cot \theta \end{pmatrix}$$

幾何学概論第二

4: Gauss の公式 (補足)

2021/01/07 5 / 17

幾何学概論第二

4: Gauss の公式 (補足)

2021/01/07 6 / 17

問題 4-1

- ▶ Gauss 枠: $\mathcal{F} := (p_u, p_v, \nu) \Rightarrow \begin{cases} \mathcal{F}_u = \mathcal{F}\Omega \\ \mathcal{F}_v = \mathcal{F}\Lambda. \end{cases}$

$$\Omega = \begin{pmatrix} \Gamma_{11}^1 & \Gamma_{12}^1 & -A_1^1 \\ \Gamma_{11}^2 & \Gamma_{12}^2 & -A_1^2 \\ L & M & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_u \cot \theta & 0 & \cot \theta \\ -\theta_v \csc \theta & 0 & -\csc \theta \\ 0 & \sin \theta & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \Gamma_{12}^1 & \Gamma_{22}^1 & -A_2^1 \\ \Gamma_{12}^2 & \Gamma_{22}^2 & -A_2^2 \\ M & N & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\theta_v \csc \theta & -\csc \theta \\ 0 & \theta_u \cot \theta & \cot \theta \\ \sin \theta & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- ▶ 適合条件 (可積分条件): $\Omega_v - \Lambda_u - \Omega\Lambda + \Lambda\Omega = O$.

$$\begin{pmatrix} \theta_{uv} \cot \theta - \cos \theta & \theta_{uv} \csc \theta - 1 & 0 \\ -\theta_{uv} \csc \theta + 1 & -\theta_{uv} \cot \theta + \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = O$$

問題 4-1

Q

フルネ枠を考えていたときの $\frac{d}{ds} \mathcal{F}(s) = \mathcal{F}(s)\Omega(s)$ の Ω は交代行列だったので, ガウス枠について考えたときにもどこかに対称性のようなものがあるのかどうかと思いましたが, ...

A

Gauss 枠は直交行列でない.

幾何学概論第二

4: Gauss の公式 (補足)

2021/01/07 7 / 17

幾何学概論第二

4: Gauss の公式 (補足)

2021/01/07 8 / 17

問題 4-1

▶ 適合条件

$$\begin{pmatrix} \theta_{uv} \cot \theta - \cos \theta & \theta_{uv} \csc \theta - 1 & 0 \\ -\theta_{uv} \csc \theta + 1 & -\theta_{uv} \cot \theta + \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ = (\theta_{uv} - \sin \theta) \begin{pmatrix} \cot \theta & \csc \theta & 0 \\ -\csc \theta & -\cot \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = O.$$

$\theta_{uv} = \sin \theta$: Sine-Gordon 方程式

問題 4-1

Q

適合条件は何を求める方程式になるのでしょうか。

A

曲面が存在すれば自動的に適合条件は満たされる。

Q

適合条件を満たさないとき、その曲面はどうなるのでしょうか？

A

そういう曲面は存在しない。

Q

適合条件を満たすとき、その Gauss 枠 \mathcal{F} が $\mathcal{F}_u = \mathcal{F}\Omega$, $\mathcal{F}_v = \mathcal{F}\Lambda$ を満たすような正則曲面をもってすることはできますか。今回

問題 4-2

問題

領域 $U = \{(u, v); v > 0\}$ で定義された正則曲面

$p(u, v) := (\cos u \operatorname{sech} v, \sin u \operatorname{sech} v, v - \tanh v)$ を考える。定数 $a (> 1)$ に対して、 U 上の曲線 $u^2 + \cosh^2 v = a^2$ を $\gamma(t) := (u(t), v(t))$ ($\dot{u} > 0, \dot{} = d/dt$) と表示し、 $\hat{\gamma}(t) = p \circ \gamma(t)$ とする。

- t が $\hat{\gamma}(t)$ の弧長パラメータとなっているとき、 $\dot{u} = \frac{1}{a} \cosh^2 v$, $\dot{v} = -\frac{v}{a} \operatorname{coth} v$ が成り立つことを示しなさい。
- 曲面上の曲線 $\hat{\gamma}$ の法曲率を κ_n 、空間曲線としての曲率を κ とするとき、 $|\kappa_n/\kappa|$ を求めなさい。

▶ 擬球面：問題 1-1 の $b = 0$ の場合。

問題 4-2

問題

$ds^2 = \operatorname{sech}^2 v du^2 + \tanh^2 v dv^2$, $II = -\operatorname{sech} v \tanh v (du^2 - dv^2)$. 定数 $a (> 1)$ に対して、 U 上の曲線 $u^2 + \cosh^2 v = a^2$ を $\gamma(t) := (u(t), v(t))$ ($\dot{u} > 0, \dot{} = d/dt$) と表示し、 $\hat{\gamma}(t) = p \circ \gamma(t)$.

- t が $\hat{\gamma}(t)$ の弧長パラメータとなっているとき、 $\dot{u} = \frac{1}{a} \cosh^2 v$, $\dot{v} = -\frac{v}{a} \operatorname{coth} v$ が成り立つことを示しなさい。

$$\ddot{u} = -\frac{2u}{a} \cosh^2 v, \quad \ddot{v} = -\frac{1}{a^2} \operatorname{coth} v \operatorname{csch}^2 v (\cosh^2 v \sinh^2 v + u^2)$$

問題 4-2

問題

$ds^2 = \operatorname{sech}^2 v du^2 + \tanh^2 v dv^2$, $II = -\operatorname{sech} v \tanh v (du^2 - dv^2)$. 定数 $a (> 1)$ に対して、 U 上の曲線 $u^2 + \cosh^2 v = a^2$ を $\gamma(t) := (u(t), v(t))$ ($\dot{u} > 0, \dot{} = d/dt$) と表示し、 $\hat{\gamma}(t) = p \circ \gamma(t)$.

- 曲面上の曲線 $\hat{\gamma}$ の法曲率を κ_n 、空間曲線としての曲率を κ とするとき、 $|\kappa_n/\kappa|$ を求めなさい。

$$\ddot{\hat{\gamma}} = (\ddot{u} + \Gamma_{11}^1 \dot{u}^2 + 2\Gamma_{12}^1 \dot{u}\dot{v} + \Gamma_{22}^1 \dot{v}^2) p_u \\ + (\ddot{v} + \Gamma_{11}^2 \dot{u}^2 + 2\Gamma_{12}^2 \dot{u}\dot{v} + \Gamma_{22}^2 \dot{v}^2) p_v + (*)\nu = (*)\nu = \kappa_n \nu. \\ \Rightarrow |\kappa_n| = |\ddot{\hat{\gamma}}| = |\kappa|.$$

問題 4-2

Q

法曲率があるなら接曲率も法曲率と同様に定義できそうですが、講義にもなければ調べてもでてこないのあまり本質とは関係ないんですか。次回にでてくるのでしょうか。

A

「測地的曲率」という。第 6 回で扱う。

Q

今回の問題 4-2 では $|\kappa_n/\kappa| = 1$ となりましたが、 $|\kappa_n/\kappa| = 1$ になるときの曲線の特徴は何がありますか？

A

測地線。第 6 回講義で扱う。

問題 4-2

Q

空間内の曲線に対して曲率が定義され、一方で同じ曲線だとしても曲面上にのると曲率は曲線とそうでない曲率に分解されます。このとき、この曲線が乗る曲面は任意にとることができますが(曲線と関係ないところではどうなっているか)この曲率の分解は一意的に定まりますか？

A

曲線がのっている曲面の法線ベクトルが変わると分解が変わる。