幾何学概論第二 (MTH.B212)

第一基本形式・第二基本形式

曲面の不変量

山田光太郎

kotaro@math.titech.ac.jp

http://www.math.titech.ac.jp/~kotaro/class/2021/geom-2/

東京工業大学理学院数学系

2021/12/16

曲面をきめる

(曲面論の基本定理)

2023. 1.

微分（differential）　全微分　外微分

座標によるものと
よらないと言いくるめる
マシン

$U \subset \mathbb{R}^2$：領域；$f\colon U \ni (u,v) \mapsto f(u,v) \in \mathbb{R}$：$C^\infty$

$$df := f_u\,du + f_v\,dv = (f_u, f_v)\begin{pmatrix} du \\ dv \end{pmatrix} : \quad f \text{ の微分}$$

多様体論

$\varphi\colon V \ni (\xi,\eta) \mapsto (u(\xi,\eta), v(\xi,\eta)) \in U$: 微分同相

パラメータ変換

足をみる

$$\begin{pmatrix} du \\ dv \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_\xi\,d\xi + u_\eta\,d\eta \\ v_\xi\,d\xi + v_\eta\,d\eta \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} u_\xi & u_\eta \\ v_\xi & v_\eta \end{pmatrix}}_{P} \begin{pmatrix} d\xi \\ d\eta \end{pmatrix} = \boxed{P\begin{pmatrix} d\xi \\ d\eta \end{pmatrix}}$$

Jacobi 行列

$\tilde{f} = f \circ \varphi$

Chain rule

$$d\tilde{f} = \boxed{(\tilde{f}_\xi, \tilde{f}_\eta)}\begin{pmatrix} d\xi \\ d\eta \end{pmatrix} = \boxed{(f_u, f_v)P}\begin{pmatrix} d\xi \\ d\eta \end{pmatrix} = (f_u, f_v)\begin{pmatrix} du \\ dv \end{pmatrix} = df.$$

$\Rightarrow$ 微分はパラメータのとり方によらない

第一基本量・第一基本形式

$$p : U \ni (u,v) \mapsto p(u,v) \in \mathbb{R}^3.$$

ベクトル値

$dp = p_u du + p_v dv = (p_u\ p_v)\begin{pmatrix} du \\ dv \end{pmatrix}$

$$\text{第一基本行列} = \widehat{I} = \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} {}^t p_u \\ {}^t p_v \end{pmatrix} (p_u, p_v)$$

$$= \begin{pmatrix} p_u \cdot p_u & p_u \cdot p_v \\ p_v \cdot p_u & p_v \cdot p_v \end{pmatrix}$$

第一基本量

$|p_u|^2$, $|p_v|^2$

$p_u \cdot p_u$

$$\text{第一基本形式} = (du, dv)\,\widehat{I}\begin{pmatrix} du \\ dv \end{pmatrix} = {}^t(dp)dp = dp \cdot dp$$

$$= E\,du^2 + 2F\,du\,dv + G\,dv^2$$

- 第一基本形式はパラメータのとり方によらない.

第一基本行列のパラメータ変換

$p : U \ni (u, v) \mapsto p(u, v) \in \mathbb{R}^3$, 正則曲面；
$\varphi\colon (\xi, \eta) \mapsto (u, v)$：パラメータ変換；
$\tilde{p} = p \circ \varphi.$

命題

p の第一基本行列を $\widehat{I}$, $\tilde{p}$ の第一基本行列を $\widetilde{\widehat{I}}$ とすると,

$$\boxed{\widetilde{\widehat{I}} = {}^t P\, \widehat{I}\, P,} \qquad \left(P = \begin{pmatrix} u_\xi & u_\eta \\ v_\xi & v_\eta \end{pmatrix} \right).$$

Jacobi 行列

P^{-1} でない

$$\begin{pmatrix} {}^t\tilde{p}_\xi \\ {}^t\tilde{p}_\eta \end{pmatrix} (\tilde{p}_\xi \ \ \tilde{p}_\eta) = {}^tP \begin{pmatrix} {}^tp_u \\ {}^tp_v \end{pmatrix} (p_u \ \ p_v) P$$

長さ・面積・角度

正則曲面 p の第一基本行列を $\widehat{I} = \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}$ とする．

命題

- 曲面の各点において $\widehat{I}$ は正値対称行列．とくに $\det \widehat{I} > 0$, $E > 0$, $G > 0$.
- $\boxed{|p_u \times p_v|^2 = EG - F^2 = \det \widehat{I}\,.}$ $\boxed{>0}$

$$\left|\frac{d}{dt} p(u(t), v(t))\right|^2 \underset{?}{=} E\dot{u}^2 + 2F\dot{u}\dot{v} + G\dot{v}^2$$

$$= \det\begin{pmatrix} \widehat{I} & \begin{matrix}0\\0\end{matrix} \\ \begin{matrix}0 & 0\end{matrix} & |p_u\times p_v|^2 \end{pmatrix}$$

$$\det(p_u, p_v, p_u\times p_v) = |p_u \times p_v|^2$$

$$|p_u\times p_v|^4 = \det\begin{pmatrix} {}^tp_u \\ {}^tp_v \\ {}^t(p_u\times p_v) \end{pmatrix}(p_u\ p_v\ p_u\times p_v)$$

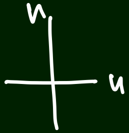
$p\colon U \ni (u,v) \mapsto p(u,v) \in \mathbb{R}^3$：正則曲面.

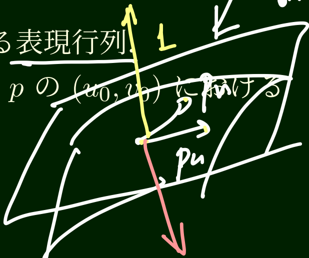
$$\left(\begin{array}{l}\text{曲面 } p \text{ の } (u_0,v_0) \in U \text{ に} \\ \text{おける接ベクトル空間}\end{array}\right) = dp(T_{(u_0,v_0)}U)$$
$$:= \mathrm{Span}(p_u(u_0,v_0), p_v(u_0,v_0)) \subset \mathbb{R}^3$$

法ベクトル

R³の内積を制限

- $dp(T_{(u_0,v_0)}U)$ は $\mathbb{R}^3$ の 2 次元部分空間.
- $\widehat{I}$ は $dp(T_{(u_0,v_0)}U)$ の内積の，基底 $\{p_u(u_0,v_0), p_v(u_0,v_0)\}$ に関する表現行列.
- $dp(T_{(u_0,v_0)}U)$ に直交するベクトルを p の (u_0,v_0) における法ベクトルという.





単位法ベクトル場

$p\colon (u,v) \mapsto p(u,v) \in \mathbb{R}^3$：正則曲面

定義

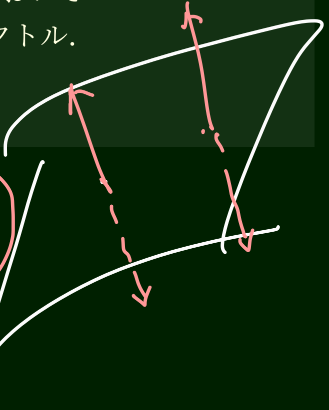
曲面 p の**単位法ベクトル場**とは，C^∞-級写像
$\nu\colon (u,v) \mapsto \nu(u,v) \in \mathbb{R}^3$ で，各 (u,v) において

- $\nu(u,v)$ は p の (u,v) における法ベクトル．
- $|\nu(u,v)| = 1$

を満たすもの．

つねに

$$\left(\nu = \pm \frac{p_u \times p_v}{|p_u \times p_v|}\right)$$



必要に応じて
どちらかをとる

p: 正則曲面, ν: 単位法ベクトル場.

ν : normal

補題

各点 (u,v) において

- ν_u, ν_v は ν に直交する.
- $p_{uu}\cdot\nu = -p_u\cdot\nu_u$,
  $p_{uv}\cdot\nu = -p_u\cdot\nu_v$,
  $p_{vu}\cdot\nu = -p_v\cdot\nu_u$,
  $p_{vv}\cdot\nu = -p_v\cdot\nu_v$.
- $\boxed{p_u\cdot\nu_v = \nu_u\cdot p_v}$.

$$\nu\cdot\nu = 1$$

$$\frac{\partial}{\partial u}\,\nu\cdot\nu = 0$$

$$2\nu_u\cdot\nu$$

"部分"

$$p_{uu}\cdot\nu = (p_u\cdot\nu)_u - p_u\cdot\nu_u = -p_u\cdot\nu_u$$

$$0$$

$$
\text{第二基本行列} = \widehat{I\!I} = \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} := -\begin{pmatrix} {}^t p_u \\ {}^t p_v \end{pmatrix} (\nu_u, \nu_v)
$$

$$
= -\begin{pmatrix} p_u \cdot \nu_u & p_u \cdot \nu_v \\ p_v \cdot \nu_u & p_v \cdot \nu_v \end{pmatrix}
$$

$$
\text{第二基本形式} = (du, dv)\, \widehat{I\!I} \begin{pmatrix} du \\ dv \end{pmatrix} = -{}^t(dp)d\nu = -dp \cdot d\nu
$$

$$
= L\,du^2 + 2M\,du\,dv + N\,dv^2
$$

習慣

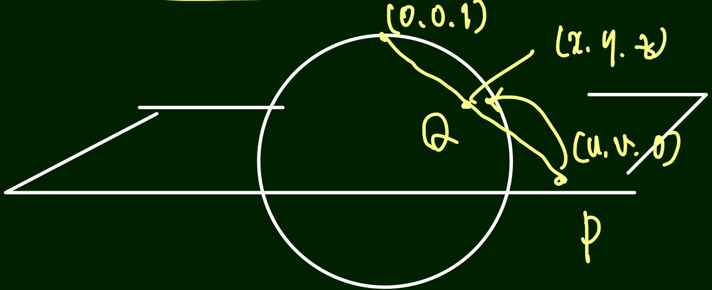
第二基本形式はパラメータのとり方によらない

$$
\boxed{\tilde{\widehat{I\!I}} = {}^tP\, \widehat{I\!I}\, P}
$$

問題 2-1

問題

$\mathbb{R}^3$ の単位球面 $S^2 := \{\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^3 \,;\, |\boldsymbol{x}| = 1\}$ 上の点 $\mathrm{N} = {}^t(0,0,1)$ を取る．xy 平面上の点 $\mathrm{P} = {}^t(u,v,0)$ に対して N, Q, P が同一直線上にあるような $S^2 \setminus \{\mathrm{N}\}$ 上の点 Q がただ一つ存在する．この Q を $p(u,v)$ と書くと，p は $S^2 \setminus \{\mathrm{N}\}$ の正則なパラメータ表示を与える．この第一基本形式，第二基本形式を求めなさい．



問題 2-2

問題

実数 α に対して

$$p_\alpha(u,v) := \begin{pmatrix} \cos\alpha\cos v\cosh u - \sin\alpha\sin v\sinh u \\ \cos\alpha\sin v\cosh u + \sin\alpha\cos v\sinh u \\ u\cos\alpha - v\sin\alpha \end{pmatrix}$$

とおく．このとき p_α の第一基本形式，第二基本形式を求めなさい．

本日の課題の提出締切は

2021年12月20日（月曜日）07:00 JST