

Analiza III R

Wykładowca:
dr hab. Katarzyna Grabowska

Skryba:
Szymon Cedrowski

Spis treści

1	Geometria różniczkowa	4
	Powtórka z Analizy II	4
	Objętość kuli B_n	4
	Pole powierzchni sfery n -wymiarowej	7
	Strumień pola przez ramkę	8
	Lemat Poincare	10
	Forma pierwotna do 1-formy na \mathbb{R}^2	11
	Dowód Lematu Poincare	14
	Szukanie potencjału wektorowego	17
	Wstęp do twierdzenia Stokesa	18
	Twierdzenie Stokesa	19
	Rozmaitość z brzegiem	19
	Gładki rozkład jedności	21
	Dowód twierdzenia Stokesa	22
	Klasyczne wersje twierdzenia Stokesa	23
2	Analiza zespolona	27
	Różniczkowanie w sensie zespolonym	27
	Przekształcenia \mathbb{C} -liniowe	27
	Różniczkowanie w sensie rzeczywistym i zespolonym	28
	Operatory $\partial/\partial z$, $\partial/\partial \bar{z}$	31
	Funkcje holomorficzne	31
	Baza dualna przestrzeni i formy na \mathbb{C}	32
	Całkowanie funkcji holomorficznych	34
	Twierdzenie Cauchy'ego	34
	Własności funkcji holomorficznych	36
	n -te pochodne funkcji holomorficznych	38
	Nierówności całkowite	39
	Szeregi	41
	Rozwinięcie funkcji holomorficznej w szereg Taylora	42
	Ważne funkcje holomorficzne	44
	Rozwinięcie funkcji holomorficznej w szereg Laurenta	48
	Całkowanie przez Residua	52
	Klasyfikacja osobliwości	52
	Całki z funkcji trygonometrycznych (po okresie)	54
	Całki z funkcji wymiernych	55
	Całki z funkcji postaci $Q(x) \exp(iax)$	57
	Inne całki	59

Rozdział 1

Geometria różniczkowa

Wykład 1: Powtórka z Analizy II

16 paź 2020

Objętość kuli B_n

Obszar całkowania dany jest przez:

$$B_n = \left\{ (x^1, \dots, x^n) : \sum_{n=1}^n (x^i)^2 \leq 1 \right\}$$

Objętość będzie dana przez całkę Riemanna z 1:

$$\int_{B_n} 1 \, dx^1 \, dx^2 \cdots dx^n$$

Jak mamy współrzędne w przestrzeni \mathbb{R}^n to mamy związane z nimi wektory **bazy standardowej** w przestrzeni stycznej: $\mathbb{R}^n(x^1, \dots, x^n) \rightsquigarrow (\partial_1, \dots, \partial_n)$.

Jak całkujemy to jest potrzebna jakaś miara objętości, np. iloczyn skalarny i w bazie st. jest on przyjemną macierzą diagonalną:

$$(\partial_i \mid \partial_j)_{\text{st}} = [g]_{\text{st}} = \text{diag}(1, 1, \dots, 1)$$

Do całkowania jest nam potrzebna również kanoniczna forma objętości $\Omega_n = dx^1 \wedge \cdots \wedge dx^n$ i wtedy przechodzimy z całki Riemanna do obiektu z geometrii różniczkowej:

$$\int_{B_n} dx^1 \cdots dx^n = \int_{(B_n, \iota_+)} \Omega_n$$

Musimy najpierw zamienić zmienne na takie współrzędne wielo-sferyczne. Działają bardzo podobnie jak zwykle biegunowe i sferyczne. A oto algorytm ich tworzenia.

Bierzemy najpierw st: $(x^1, x^2, \dots, x^{n-1}, x^n)$ i ruszając tylko ostatnie dwie zmienne przekształcamy je na biegunowe sf1: $(x^1, \dots, x^{n-2}, r^{n-1}, \phi^{n-1})$ takie, że:

$$\begin{cases} x^{n-1} = r^{n-1} \cos \phi^{n-1} \\ x^n = r^{n-1} \sin \phi^{n-1} \end{cases}$$

Teraz trzeba napisać macierz zamiany zmiennych czyli macierz identyczności z bazy sf1 do st. Wspomnienia z algebry:

Twierdzenie 1 (Zmiana formy dwuliniowej przy zmianie bazy).

$$[g]_{\text{sf1}}^{\text{sf1}} = \left([\text{id}]_{\text{sf}}^{\text{st}} \right)^{\top} [g]_{\text{st}}^{\text{st}} [\text{id}]_{\text{sf}}^{\text{st}}$$

iloczyn skalarny w nowej bazie = macierz zamiany zmiennych[†] · iloczyn skalarny w starej bazie · macierz zamiany zmiennych

Dygresja. Można by tensorowo? Przy przejściu ze współrzędnych (x^1, \dots, x^n) do (x'^1, \dots, x'^n) mamy:

$$g'_{\nu'_1 \nu'_2} = \sum_{\nu_1, \nu_2} g_{\nu_1 \nu_2} \frac{\partial x^{\nu_1}}{\partial x'^{\nu'_1}} \frac{\partial x^{\nu_2}}{\partial x'^{\nu'_2}}$$

Wracając do wcześniejszego liczenia, w układzie biegunowym mamy:

$$\begin{aligned} \partial_r &= \frac{\partial x}{\partial r} \partial_x + \frac{\partial y}{\partial r} \partial_y \\ &= \cos \phi \cdot \partial_x + \sin \phi \cdot \partial_y \\ \partial_\phi &= -r \sin \phi \cdot \partial_x + r \cos \phi \cdot \partial_y \end{aligned}$$

Wówczas w bazie standardowej,

$$[\partial_r]^{\text{st}} = \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{bmatrix}, \quad [\partial_\phi]^{\text{st}} = \begin{bmatrix} -r \sin \phi \\ r \cos \phi \end{bmatrix}$$

Macierz przejścia z bazy do bazy składa się z wektorów nowej bazy zapisanej w starej bazie, czyli w naszym przypadku:

$$[\text{id}]_{\text{sf1}}^{\text{st}} = \text{diag}(1, \dots, 1) \oplus \begin{bmatrix} \cos \phi^{n-1} & -r^{n-1} \sin \phi^{n-1} \\ \sin \phi^{n-1} & r^{n-1} \cos \phi^{n-1} \end{bmatrix} = M_1$$

Teraz robimy drugą zamianę bazy. Startujemy z sf1. Bierzemy dwie ostatnie współrzędne metryczne x^{n-2} , r^{n-1} i będą nowe współrzędne sf2: $(x^1, \dots, r^{n-2}, \phi^{n-2}, \phi^{n-1})$ takie, że:

$$\begin{cases} x^{n-2} = r^{n-2} \cos \phi^{n-2} \\ r^{n-1} = r^{n-2} \sin \phi^{n-2} \end{cases}$$

przy czym $r^{n-2} \in (0, \infty)$, natomiast w odróżnieniu od $\phi^{n-1} \in (0, 2\pi)$, mamy $\phi^{n-2} \in (0, \pi)$. A jest tak dlatego, że $r^{n-1} > 0$, zatem większe argumenty sinusa by nam to psuły. W przejściu sf1 \rightarrow sf2 zostaje taka sama ostatnia zmienna ϕ^{n-1} zatem

$$[\text{id}]_{\text{sf2}}^{\text{sf1}} = \underbrace{\text{diag}(1, \dots, 1)}_{(n-3) \times (n-3)} \oplus \begin{bmatrix} \cos \phi^{n-2} & -r^{n-2} \sin \phi^{n-2} \\ \sin \phi^{n-2} & r^{n-2} \cos \phi^{n-2} \end{bmatrix} \oplus \text{diag}(1) = M_2$$

Możemy tak zamieniać dalej. Wtedy,

$$\begin{aligned} [g]_{\text{sf2}}^{\text{sf2}} &= M_2^{\top} [g]_{\text{sf1}}^{\text{sf1}} M_2 \\ &= M_2^{\top} M_1^{\top} [g]_{\text{st}}^{\text{st}} M_1 M_2 \\ &= M_2^{\top} M_1^{\top} M_1 M_2 \\ &= M_2^{\top} \left[\underbrace{\text{diag}(1, \dots, 1)}_{n-2} \oplus \text{diag}\left(1, (r^{n-1})^2\right) \right] M_2 \end{aligned}$$

Zauważmy, że to pojedyncze przekształcenie de facto działa nam za każdym razem na jakies dwa elementy z macierzy klatkowej.

$$\begin{aligned} &= \text{diag}\left(1, \dots, 1, (r^{n-2})^2, (r^{n-1})^2\right) \\ &= \text{diag}\left(1, \dots, 1, (r^{n-2})^2, (r^{n-2} \sin \phi^{n-2})^2\right) \end{aligned}$$

Widzimy już co się będzie działo jak będziemy dalej przesuwali sf2 do sf(n-1): $(r, \phi^1, \phi^2, \dots, \phi^{n-1})$, gdzie

$$\begin{cases} x_1 = r \cos \phi^1 \\ r^2 = r \sin \phi^1 \end{cases}$$

Wówczas,

$$\begin{aligned} [g]_{\text{sf}(n-1)}^{\text{sf}(n-1)} &= \begin{bmatrix} \cos \phi^1 & \sin \phi^1 \\ -r \sin \phi^1 & r \cos \phi^1 \end{bmatrix} \text{diag}\left(1, 1, (r^2)^2, \dots, (r^{n-1})^2\right) \begin{bmatrix} \cos \phi^1 & -r \sin \phi^1 \\ \sin \phi^1 & r \cos \phi^1 \end{bmatrix} \\ &= \text{diag}\left(1, r^2, (r \sin \phi^1)^2, (r \sin \phi^1 \sin \phi^2)^2, \dots, (r \sin \phi^1 \sin \phi^2 \dots \sin \phi^{n-2})^2\right) \end{aligned}$$

Teraz bardzo łatwo policzymy wyznacznik macierzy diagonalnej:

$$\sqrt{\det g} = r^{n-1} (\sin \phi^1)^{n-2} \dots (\sin \phi^{n-2})$$

Przypomnijmy sobie pewną całkę:

$$\begin{aligned} \int_0^\pi \sin^n \phi \, d\phi &= -\sin^{n-1} \phi \cos \phi \Big|_0^\pi + (n-1) \int_0^\pi \sin^{n-2} \phi \cos^2 \phi \, d\phi \\ &= (n-1) \int_0^\pi \sin^{n-2} \phi \, d\phi - (n-1) \int_0^\pi \sin^n \phi \, d\phi \end{aligned}$$

Dostajemy wzór rekurencyjny:

$$(*) = \int_0^\pi \sin^n \phi \, d\phi = \frac{n-1}{n} \int_0^\pi \sin^{n-2} \phi \, d\phi$$

Teraz rozważamy względem parzystości:

1. $n = 2k$

$$\begin{aligned} (*) &= \frac{2k-1}{2k} \frac{2k-3}{2k-2} \int_0^\pi \sin^{2k-4} \phi \, d\phi = \frac{(2k-1)(2k-3) \dots 3}{2k(2k-2) \dots 4} \int_0^\pi \sin^2 \phi \, d\phi \\ &= \frac{(2k-1)!!}{2k!!} \pi \end{aligned}$$

2. $n = 2k+1$

$$(*) = \frac{2k!!}{(2k+1)!!} \int_0^\pi \sin \phi \, d\phi = 2 \cdot \frac{2k!!}{(2k+1)!!}$$

Teraz możemy policzyć objętość kuli n -wymiarowej.

$$\Omega_n = r^{n-1} (\sin \phi^1)^{n-2} \cdots (\sin \phi^{n-2}) dr \wedge d\phi^1 \wedge \cdots \wedge d\phi^{n-1}$$

W kategoriach całki Riemanna mamy zamianę zmiennych postaci:

$$dx^1 \cdots dx^n = \det(M_n M_{n-1} \cdots M_2 M_1) dr \cdots d\phi^{n-1}$$

Nie robiliśmy tego w taki sposób, bo bezpośrednie mnożenie tych macierzy zamiany zmiennych jest bardzo kłopotliwe. Z formami różniczkowymi i iloczynem skalarnym wyszło prościej.

$$\begin{aligned} \text{Vol}_{2k} &= \int_0^R r^{2k-1} dr \int_0^\pi (\sin \phi^1)^{2k-2} d\phi^1 \cdots \int_0^\pi \sin \phi^{2k-2} d\phi^{2k-2} \int_0^{2\pi} d\phi^{2k-1} \\ &= \frac{1}{2k} R^{2k} \cdot 2\pi \cdot \left(\text{te wszystkie współczynniki} \right) = R^{2k} \frac{1}{2k} \frac{1}{(2k-2)!!} \pi^k 2^k \\ &= \frac{\pi^k}{k!} R^{2k} \end{aligned}$$

To samo powtarzamy dla przypadku nieparzystego.

$$\text{Vol}_{2k+1} = \frac{\pi^k 2^{k+1}}{(2k+1)!!} R^{2k+1}$$

Pole powierzchni sfery n -wymiarowej

Wygodniej będzie liczyć pole $(n-1)$ -wymiarowej sfery zanurzonej w \mathbb{R}^n .

Przepis na formę objętości:

1. Zanurzenie $S^{n-1} \subset \mathbb{R}^n$
2. Metryka w \mathbb{R}^n
3. Obcięcie formy do S^{n-1}
4. Produkcja formy objętości i całkowanie.

Obcięcie oznacza ustalenie $r = R$. Wtedy przestajemy formę obliczać na wektorze dr i wymiar macierzy spada.

$$g|_{S^{n-1}} = \text{diag}\left(R^2, (R \sin \phi^1)^2, \dots, (R \sin \phi^1 \cdots \sin \phi^{n-2})^2\right)$$

Pole powierzchni sfery to będzie całka z obciętej formy objętości:

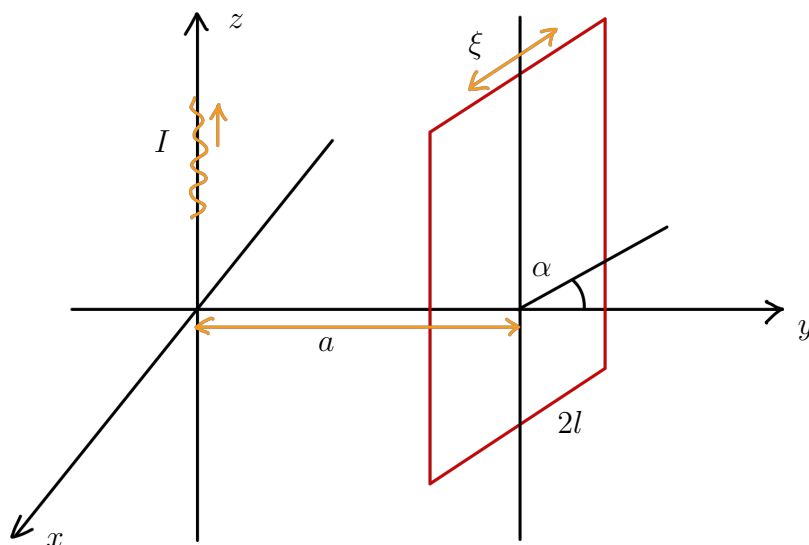
$$S = \int_{(S^{n-1}, i_+)} \Omega = \int_{(S^{n-1}, i_+)} \sqrt{\det g|_{S^{n-1}}} d\phi^1 \wedge \cdots \wedge d\phi^{n-1}$$

Rachunkowo to ta sama całka co poprzednio z pominięciem całki po r , wobec tego

$$= \begin{cases} \frac{2\pi^k}{(k-1)!} R^{2k-1}, & n = 2k \\ \frac{2^{k+1}\pi^k}{(2k-1)!!} R^{2k}, & n = 2k+1 \end{cases}$$

Przy czym pamiętamy, że n to wymiar przestrzeni, w której zanurzamy.

Strumień pola przez ramkę



Rysunek 1.1: ramka

Potencjał wektorowy \vec{A} pola \vec{B} :

$$\vec{A}(x, y, z) = -K \log \sqrt{x^2 + y^2} \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$$

Strumień pola przez powierzchnię liczymy definiując pole normalne \vec{n} , wyznaczamy element powierzchni $d\sigma$ i całkujemy po powierzchni Σ .

$$\int_{\Sigma} (\vec{n} | \vec{x}) d\sigma$$

Wprowadźmy w otoczeniu Σ układ współrzędnych taki jaki byłby wygodny (x^1, \dots, x^n) : $\Sigma = \{x^1 = 0\}$, $\|\partial_{x^1}\| = 1$, $(\partial_{x^1} | \partial_{x^i}) = 0$. Czyli $\vec{n} = \partial_{x^1}$. Wówczas rachunki są prostsze, bo metryka wygląda:

$$g = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & g_{22} & \cdots & g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & g_{2n} & \cdots & g_{nn} \end{bmatrix} \implies d\sigma = \sqrt{\det g} dx^2 \cdots dx^n$$

Weźmy nasze pole $\vec{x} = x^1 \partial_1 + x^2 \partial_2 + \cdots + x^n \partial_n$. Z założenia mamy, że $(\vec{n} | \vec{x}) = x^1$, zatem:

$$\int_{\Sigma} (\vec{n} | x) d\sigma = \int_{\Sigma} x^1 \sqrt{\det g} dx^2 \cdots dx^n$$

Używając geometrii różniczkowej można prościej. Mamy powierzchnię zanurzoną $\Sigma \subset \mathbb{R}^n$ i formę objętości $\Omega = \sqrt{\det g} dx^1 \wedge \cdots \wedge dx^n$.

Popatrzmy na pole wektorowe x zwężone z Ω (tensorowo $\Omega_{[a_1 \dots a_n]} x^{a_1}$):

$$x \lrcorner \Omega = \sqrt{\det g} (x^1 dx^2 \wedge \cdots \wedge dx^n - x^2 dx^1 \wedge dx^3 \wedge \cdots \wedge dx^n + \cdots \pm x^n dx^1 \wedge \cdots \wedge dx^{n-1})$$

Zauważmy, że na powierzchni Σ z wyżej wybranymi współrzędnymi $x^1 = 0$, zatem przy obcięciu formy Ω do powierzchni zerują się wszystkie wedge, które zawierają dx^1 .

$$x \lrcorner \Omega|_{\Sigma} = \sqrt{\det g} x^1 dx^2 \wedge \cdots \wedge dx^n$$

Licząc całkę z tej zwężonej formy,

$$\begin{aligned} \int_{(\Sigma,+)} x \lrcorner \Omega &= \int_{(\Sigma,+)} \sqrt{\det g} x^1 dx^2 \wedge \cdots \wedge dx^n \\ &= \int_{\Sigma} x^1 \sqrt{\det g} dx^2 \cdots dx^n \end{aligned}$$

Wyrażenie po lewej stronie jest obiektem czysto geometrycznym i nie zależy od współrzędnych. Możemy więc olać tę metodę ze szczególnym układem i liczyć ten obiekt po lewej.

Wracając do naszego zadania. Mamy liczyć strumień pola $B = \text{rot } A$ czyli chcemy całkować $B \lrcorner \Omega = dG(A)$ (z definicji rotacji A), gdzie $G: TM \rightarrow T^*M$ jest iloczynem skalarnym. Użyjemy współrzędnych walcowych.

$$\begin{cases} x = r \cos \phi \\ y = r \sin \phi \\ z = z \end{cases}, \quad g = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Omega = r dr \wedge d\phi \wedge dz$$

Liczymy $G(A)$ gdzie A było dane w wyżej.

$$\begin{aligned} G(A) &= -K \log r dz \quad (\text{tensorowo } g_{ab} A^a = A_b) \\ dG(A) &= -K \frac{1}{r} dr \wedge dz = K \frac{1}{r} dz \wedge dr \end{aligned}$$

Musimy wprowadzić parametryzację ramki.

$$\begin{cases} y = a + \xi \cos \alpha \\ x = -\xi \sin \alpha \\ z = z \end{cases}, \quad \xi \in [-l, l], z \in [-l, l]$$

Formę zdefiniowaną na całym \mathbb{R}^3 musimy obciąć do samej ramki.

$$\begin{aligned} r^2 &= x^2 + y^2 \\ 2r dr &= 2x dx + 2y dy \\ dr &= \frac{x}{r} dx + \frac{y}{r} dy = \frac{1}{r} (\xi \sin \alpha (d\xi) \sin \alpha + (a + \xi \cos \alpha) d\xi \cos \alpha) \\ &= \frac{1}{r} (a \cos \alpha + \xi) d\xi \end{aligned}$$

Teraz możemy liczyć dalej.

$$\begin{aligned} dG(A) &= K \frac{1}{r} dx \wedge dr \\ dG(A)|_{\Sigma} &= K \frac{1}{r} dz \wedge \left(\frac{1}{r} (a \cos \alpha + \xi) d\xi \right) \\ &= \frac{1}{r^2} K (a \cos \alpha + \xi) dz \wedge d\xi \\ r^2 &= \xi^2 + a^2 + 2a\xi \cos \alpha \end{aligned}$$

Liczymy ostatecznie całkę.

$$\begin{aligned} \int_{(\Sigma,+)} dG(A) &= \int_{\Sigma} -\frac{1}{r^2} K (a \cos \alpha + \xi) d\xi dz \\ &= -\frac{1}{2} \int_{-l}^l dz \int_{-l}^l d\xi K \frac{2a \cos \alpha + 2\xi}{a^2 + 2a\xi \cos \alpha + \xi^2} \end{aligned}$$

Licznik jest pochodną mianownika po ξ . Funkcja nie zależy też od z .

$$\begin{aligned} &= -\frac{1}{2} 2lK \ln(a^2 + 2al \cos \alpha + l^2) \Big|_{-l}^l \\ &= -Kl \ln \left(\frac{a^2 + 2al \cos \alpha + l^2}{a^2 - 2a\xi \cos \alpha + l^2} \right) \\ &= Kl \ln \left(\frac{a^2 + l^2 - 2al \cos \alpha}{a^2 + l^2 + 2al \cos \alpha} \right) \end{aligned}$$

Policzyliśmy strumień pola B bez liczenia pola B . Ale teraz to pole też możemy prosto wyliczyć bo znamy jego ogólną postać ze wzoru ze zwężeniem.

$$B = \frac{K}{r^2} \partial_{\phi} = \frac{K}{r} \vec{e}_{\phi}$$

Wykład 2: Lemat Poincare

19 paź 2020 Niech $\alpha \in \Omega^k(M)$. Jeśli $d\alpha = 0$ to forma jest zamknięta. Jeśli $\alpha = d\beta$ to forma jest zupełna. Poza tym $d^2 = 0$. Stąd **każda forma zupełna jest zamknięta**. Zadamy pytanie czy jest implikacja w drugą stronę oraz jak szukać formy pierwotnej.

Przykład zastosowania B, A oraz $B = \text{rot } A$, czyli $B \lrcorner \Omega = dG(A)$. Zatem szukanie formy pierwotnej sprowadza się do szukania potencjału wektorowego pola. Pole, które może mieć potencjał wektorowy to $d(B \lrcorner \Omega) = \text{div}(B) = 0$, czyli pole, które ma zerową dywergencję. $\text{div } B$ jest formą zamkniętą i ma swój potencjał wektorowy, czyli jest formą zupełną.

$E = \text{grad } \phi$, czyli $G(E) = d\phi$. Forma, która jest różniczką (forma zupełna) ma z kolei zerową rotację. $\text{rot } E \lrcorner \Omega = dG(E) = d^2\phi = 0$.

Przykład motywacyjny

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{y \, dx - x \, dy}{x^2 + y^2}, \quad \mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0)\} \\
d\alpha &= d\left(\frac{y \, dx}{x^2 + y^2}\right) - d\left(\frac{x \, dy}{x^2 + y^2}\right) \\
&= \frac{x^2 + y^2 - 2y^2}{(x^2 + y^2)^2} dy \wedge dx - \frac{x^2 + y^2 - 2x^2}{(x^2 + y^2)^2} dx \wedge dy \\
&= \frac{1}{(x^2 + y^2)^2} [y^2 - x^2 - y^2 + x^2] dx \wedge dy \\
&= 0
\end{aligned}$$

Forma α jest formą zamkniętą. Czy α jest formą zupełną? Jaka to funkcja?...

Forma pierwotna do 1-formy na \mathbb{R}^2

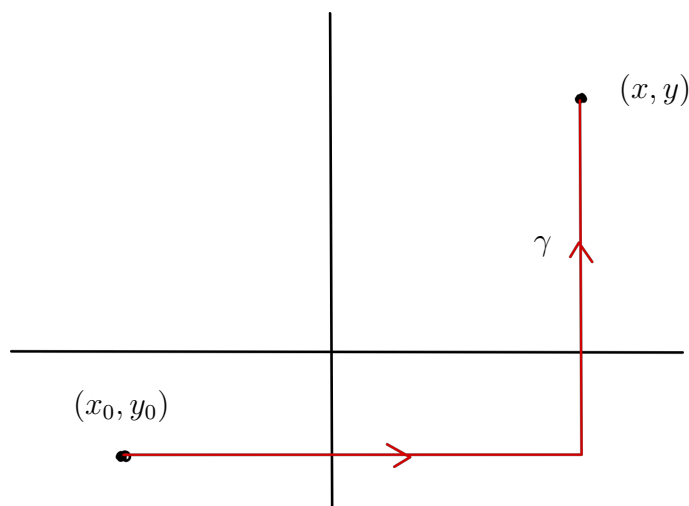
Najpierw najprostszy przypadek. Weźmy 1-formę $\beta \in \Omega^1(\mathbb{R}^2)$, $d\beta = 0$. $f, g \in C^\infty(\mathbb{R}^2)$.

$$\begin{aligned}
\beta &= f(x, y) \, dx + g(x, y) \, dy \\
d\beta &= f_y(x, y) \, dy \wedge dx + g_x(x, y) \, dx \wedge dy \\
&= (g_x - f_y) \, dx \wedge dy
\end{aligned}$$

Stąd jest warunek na zerowanie się formy:

$$g_x = f_y$$

Weźmy $h \in C^\infty(\mathbb{R}^2)$, $dh = \beta$. Proponujemy to jako funkcję pierwotną dla formy β .



Rysunek 1.2: Ścieżka całkowania.

$$h(x, y) = \int_{x_0}^x f(t, y_0) dt + \int_{y_0}^y g(x, t) dt$$

Funkcje podcałkowe są gładkie, zatem są ciągłe i możemy używać twierdzeń dla całek z parametrem.

$$dh = \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{x_0}^x f(t, y_0) dt + \int_{y_0}^y g(x, t) dt \right) dx + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{x_0}^x f(t, y_0) dt + \int_{y_0}^y g(x, t) dt \right) dy$$

Przy różniczkowaniu funkcji podcałkowych dużo się upraszcza, zatem:

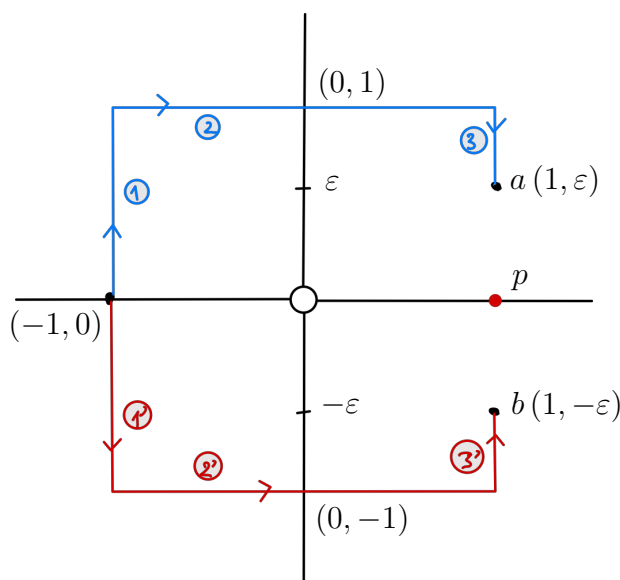
$$= \left[f(x, y_0) + \int_{y_0}^y g_x(x, t) dt \right] dx + [g(x, y)] dy$$

Warunek z góry możemy dać nam $g_x = f_y$.

$$\begin{aligned} &= \left[f(x, y_0) + \int_{y_0}^y f_t(x, t) dt \right] dx + g(x, y) dy \\ &= [f(x, y_0) + f(x, y) - f(x, y_0)] dx + g(x, y) dy \\ &= f(x, y) dx + g(x, y) dy = \beta \end{aligned}$$

Pokazaliśmy, że h jest funkcją pierwotną dla formy β . Przepis na tę formę obejmował całkowanie formy po pewnej arbitralnie ustalonej drodze. Cały rachunek zależał od tego gdzie się postawi (x_0, y_0) . To wskazuje na fakt, że funkcja pierwotna nie jest jednoznacznie wyznaczona. Ustalanie początkowego punktu powoduje zmianę funkcji pierwotnej o stałą.

Teraz pora na jakiś przykład nie istnienia formy pierwotnej.



Rysunek 1.3: Dwie równoważne drogi całkowania.

Weźmy formę $\alpha = \frac{y}{r^2} dx - \frac{x}{r^2} dy$. Naturalnie ta forma jest zdefiniowana na $\mathbb{R}^2 \setminus \{0, 0\}$. Liczymy pomocnicze całki.

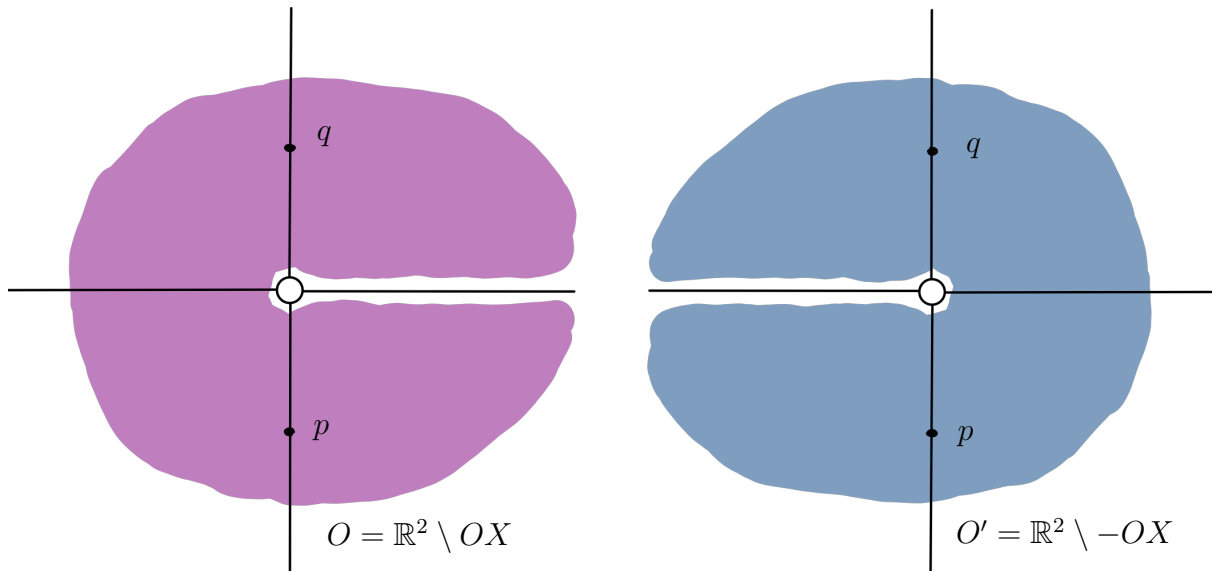
$$\int \frac{y dx}{x^2 + y^2} = \arctan\left(\frac{x}{y}\right) + C$$

$$\int \frac{x dy}{x^2 + y^2} = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + C$$

$$\begin{aligned} h(a) &= \underbrace{-\arctan\left(\frac{y}{-1}\right)\bigg|_0^1}_1 + \underbrace{\arctan\left(\frac{x}{1}\right)\bigg|_{-1}^1}_2 - \underbrace{\arctan\left(\frac{y}{1}\right)\bigg|_1^\varepsilon}_3 \\ &= -\arctan(-y)\bigg|_0^1 + \arctan(x)\bigg|_{-1}^1 - \arctan(y)\bigg|_1^\varepsilon \\ &= \pi - \arctan \varepsilon \\ h(b) &= \underbrace{-\arctan(-y)\bigg|_0^{-1}}_{1'} + \underbrace{\arctan(-x)\bigg|_{-1}^1}_{2'} - \underbrace{\arctan(y)\bigg|_{-1}^\varepsilon}_{3'} \\ &= -\pi + \arctan \varepsilon \end{aligned}$$

Teraz dążymy do punktu p , zatem $a, b \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} p$. Otrzymujemy $h(a) \rightarrow \pi$ oraz $h(b) \rightarrow -\pi$. Dostajemy różne wyniki, zatem nasz przepis zawiódł. Okazuje się, że niezależnie od wybranego przepisu będzie źle.

Wprowadźmy sobie dwa biegunowe układy współrzędnych na tym obszarze.



Rysunek 1.4: Dwa biegunowe układy współrzędnych.

$$O: \begin{cases} x = r \cos \phi \\ y = r \sin \phi \end{cases}, \phi \in (0, 2\pi), \quad O': \begin{cases} x = r' \cos \phi' \\ y = r' \sin \phi' \end{cases}, \phi' \in (-\pi, \pi)$$

Zauważmy, że nasza forma wyraża się w tych współrzędnych jako: $\alpha = -d\phi = -d\phi'$. Stąd,

$$h_0(r, \phi) = -\phi, \quad h_1(r', \phi') = -\phi'$$

Gdyby istniała funkcja f której szukamy, dobrze określona na całym $\mathbb{R}^2 \setminus \{0, 0\}$ to te funkcje h musiałyby się różnić od f o stałą: $f = h_0 + \phi_0 = h_1 + \phi_1$. Policzmy sobie $f(p)$ i $f(q)$.

$$f(p) = \frac{3\pi}{2} + \phi_0 = -\frac{\pi}{2} + \phi_1$$

$$\phi_1 = \phi_0 + 2\pi$$

$$f(q) = \frac{\pi}{2} + \phi_0 = \frac{\pi}{2} + \phi_1$$

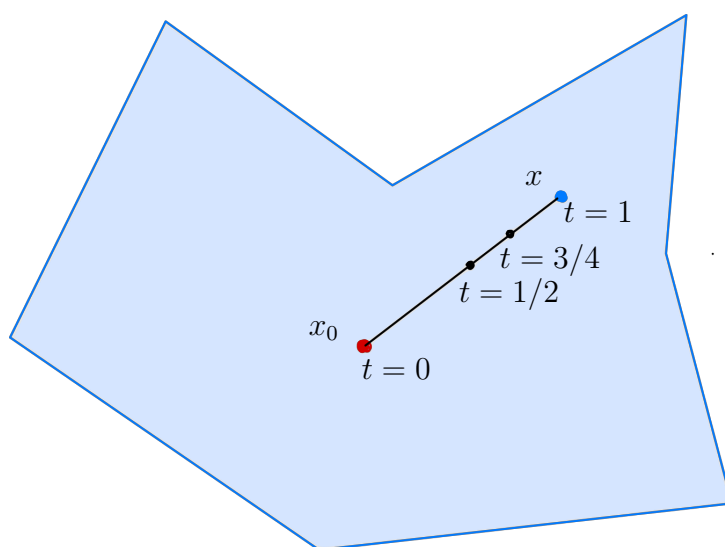
$$\phi_0 = \phi_1$$

To jest sprzeczność. Nie da się więc dobrać takich stałych, aby dostać funkcję określoną na całym \mathbb{R}^2 (dla tej formy). Czyli dla formy α nie istnieje funkcja pierwotna. Widzimy więc, że nie zawsze da się znaleźć formę pierwotną. Muszą być jakieś nietrywialne założenia. Póki co widzimy, że jeśli 1-forma jest określona na całym \mathbb{R}^2 to da się znaleźć funkcję pierwotną, ale jeśli mamy wyjęty punkt $(0, 0)$ to nie musi się dać.

Wykład 3: Dowód Lematu Poincare

23 paź 2020

Definicja 1 (Obszar gwiaździsty). Obszar nazywamy gwiaździstym względem punktu x_0 , jeśli wraz z każdym punktem x zawiera cały odcinek łączący x i x_0 .



Rysunek 1.5: Obszar gwiaździsty.

Twierdzenie 2 (Lemat Poincare). Każda forma zamknięta α : $d\alpha = 0$ na obszarze gwiaździstym w \mathbb{R}^n jest zupełna, czyli $\alpha = d\beta$.
Wystarczy, żeby zbiór był gwiaździsty względem dowolnego punktu.
Dla dowolnych powierzchni zbiór musi być ściągalny.

Dowód. Dowód jest konstruktywny, czyli zapewnia nam metodę szukania takich form pierwotnych. Niech O – obszar gwiaździsty w \mathbb{R}^n względem 0 , otwarty. Definiujemy odwzorowanie F :

$$[0, 1] \times O \ni (t, x) \xrightarrow{F} tx \in O$$

Przykładowo, $F(1, \cdot) = \text{id}_O$, $F(0, \cdot) = 0$. Generalnie, F nosi nazwę odwzorowania ściągającego. Potrzebujemy jeszcze odwzorowania na przestrzeni form różniczkowych.

$$\Omega^{k+1}([0, 1] \times O) \xrightarrow{K} \Omega^k(O)$$

Jest to liniowe odwzorowanie ze względu na mnożenie przez liczby (nie przez funkcje). Możemy oddzielnie zdefiniować 2 typy form, które mogą się pojawić.

$$\begin{aligned} a(t, x) dt \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \\ b(t, x) dx^{j_1} \wedge \dots \wedge dx^{j_{k+1}} \end{aligned}$$

Dla tego drugiego rodzaju form odwzorowanie znika:

$$K\left(b(t, x) dx^{j_1} \wedge \dots \wedge dx^{j_{k+1}}\right) = 0$$

Dla pierwszego rodzaju,

$$K\left(a(t, x) dt \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}\right) = \left(\int_0^1 a(t, x) dt\right) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}$$

Będziemy chcieli udowodnić, że $dK(F^*\alpha) + K(dF^*\alpha) = \alpha$. Teraz po prostu sprawdzamy rachunkowo ten wzór. $\alpha = \alpha(x^1, \dots, x^n) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \in \Omega^k(O)$.

Zacniemy od pullbacku formy α .

$$F^*\alpha = \alpha(tx^1, \dots, tx^n) dt x^{i_1} \wedge \dots \wedge \underbrace{dx^{i_k}}_{tdx^{i_k} + x^{i_k}dt}$$

Mamy iloczyn zewnętrzny, zatem pojawiają się wyrazy albo z $1 dt$ albo t w ogóle się nie pojawia.

$$= \underbrace{\alpha(tx) t^k dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}}_{\text{nie daje wkładu do } K} + \sum_{m=1}^k t^{k-1} x^{i_m} (-1)^{m-1} \alpha(tx) dt \wedge \underbrace{dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}}_{\text{bez } i_m}$$

Teraz liczymy następną rzecz:

$$K(F^*\alpha) = \sum_{m=1}^k (-1)^{m-1} \left(\int_0^1 x^{i_m} \alpha(tx) t^{k-1} dt \right) \underbrace{dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}}_{\text{bez } i_m}$$

Teraz różniczkujemy po x :

$$\begin{aligned} dK(F^*\alpha) &= \sum_{n=1}^k \underbrace{(-1)^{m-1}}_{\text{znika}} \left(\int_0^1 \alpha(tx) t^{k-1} dt \right) dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_m} \wedge dx^{i_k} \\ &\quad + \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k (-1)^{m-1} x^{i_m} \left(\int_0^1 t^k \frac{\partial \alpha}{\partial x^j} dt \right) dx^j \wedge \underbrace{dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k}}_{\text{bez } i_m} \\ &= k \left(\int_0^1 \alpha(tx) t^{k-1} dt \right) dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k} + \left(\text{druga część} \right) \end{aligned}$$

Teraz liczymy różniczkę $dF^*\alpha = F^*d\alpha$.

$$\begin{aligned} F^*d\alpha &= F^* \left(\sum_{j=1}^n \frac{\partial \alpha}{\partial x^j} dx^j \wedge dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k} \right) \\ &= t^{k+1} \sum_{j=1}^n \frac{\partial \alpha}{\partial x^j}(tx) dx^j \wedge dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k} + t^k \sum_{j=1}^n \frac{\partial \alpha}{\partial x^j}(tx) x^j dt \wedge dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k} \\ &\quad + t^k \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k \frac{\partial \alpha}{\partial x^j}(tx) x^{i_m} (-1)^m dt \wedge dx^j \wedge \underbrace{dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k}}_{\text{bez } i_m} \end{aligned}$$

Pierwszy składnik nie daje wkładu do K .

$$\begin{aligned} K(dF^*\alpha) &= \sum_{j=1}^n \left(\int_0^1 x^j t^k \frac{\partial \alpha}{\partial x^j} dt \right) dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k} \\ &\quad + \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^k (-1)^m x^{i_m} \left(\int_0^1 t^k \frac{\partial \alpha}{\partial x^j} dt \right) dx^j \wedge \underbrace{dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k}}_{\text{bez } i_m} \end{aligned}$$

Tak! Jakby jeszcze nie było tego widać, policzyliśmy oba składniki dowodzonej tożsamości. Teraz trzeba je dodać. Te części zawierające podwójne sumy są jednakowe z dokładnością do znaku. W związku z tym, te części mają znak przeciwny. Po dodaniu się zerują. Zostaje wówczas:

$$\begin{aligned} dK(F^*\alpha) + K(dF^*\alpha) &= k \left(\int_0^1 \alpha(tx) t^{k-1} dt \right) dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k} \\ &\quad + \sum_{j=1}^n \left(\int_0^1 x^j t^k \frac{\partial \alpha}{\partial x^j} dt \right) dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k} \\ &= \left\{ \int_0^1 \left[k t^{k-1} \alpha(tx) + t^k \sum_{j=1}^n x^j \frac{\partial \alpha}{\partial x^j} \right] dt \right\} dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k} \\ &= \left\{ \int_0^1 \frac{d}{dt} (t^k \alpha(tx)) dt \right\} dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k} \\ &= t^k \alpha(tx) \Big|_0^1 dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k} \\ &= \alpha(x) dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_k} - 0 = \alpha \end{aligned}$$

Dowiedliśmy tego wzoru. Sprawdźmy co, jeśli $d\alpha = 0$. Wówczas,

$$K(dF^*\alpha) = K(F^*d\alpha) = 0$$

W związku z tym,

$$\alpha = dK(F^*\alpha)$$

Otrzymaliśmy więc wzór na formę pierwotną β .

Wniosek 1.

$$\beta = K(F^*\alpha)$$

■

Najlepszą metodą liczenia formy pierwotnej jest jej zgadnięcie. Metoda liczenia z lematu jest ciężka. Policzmy to sobie.

Szukanie potencjału wektorowego

Znaleźć potencjał wektorowy dla pola:

$$B(x, y, z) = (x + y) \frac{\partial}{\partial x} + (x + z) \frac{\partial}{\partial y} + (y - z) \frac{\partial}{\partial z}$$

Mówimy, że B ma potencjał wektorowy jeśli $B = \text{rot } A$. Wiemy, że $\text{rot } A \lrcorner \Omega = dG(A)$. B może więc mieć potencjał wektorowy, gdy $d(B \lrcorner \Omega) = 0$, czyli $(\text{div } B)\Omega = 0$. Policzmy więc dywergencję naszego pola.

$$\text{div } B = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 1 + 0 - 1 = 0$$

Pole jest określone na całym \mathbb{R}^3 , możemy więc skorzystać z lematu Poincare. W naszym przypadku pole przerobimy na formę zwięzając je z formą objętości na \mathbb{R}^3 .

$$\omega = B \lrcorner \Omega = (x + y) dy \wedge dz + (x + z) dz \wedge dx + (y - z) dx \wedge dy$$

Szukamy formy pierwotnej do powyższej formy. Forma pierwotna powinna być postaci $K(F^*\omega)$.

$$\begin{aligned} F: [0, 1] \times \mathbb{R}^3 &\ni (t, x, y, z) \mapsto (tx, ty, tz) \in \mathbb{R}^3 \\ F^*\omega &= (tx + ty) d(ty) \wedge d(tz) + (tx + tz) d(tz) \wedge d(tx) + (ty - tz) d(tx) \wedge d(ty) \\ &= t^2(x + y)y dt \wedge dz - t^2(x + y)z dt \wedge dy + t^3(x + y) dy \wedge dz \\ &\quad + t^2(x + z)z dt \wedge dx - t^2(x + z)x dt \wedge dz + t^3(x + z) dz \wedge dx \\ &\quad + t^2(y - z)x dt \wedge dy - t^2(y - z)y dt \wedge dx + t^3(y - z) dx \wedge dy \end{aligned}$$

Wyrażenia bez dt nie dają wkładu do K . Porządkujemy to, co ma dt .

$$\begin{aligned} &= t^2(xy + y^2 - x^2 - xz) dt \wedge dz + t^2(-xz - yz + xy - xz) dt \wedge dy \\ &\quad + t^2(xz + z^2 - y^2 + yz) dt \wedge dx + R(x, y, z) \end{aligned}$$

Liczymy całkę pomocniczą: $\int_0^1 t^2 dt = \frac{1}{3}$.

$$K(F^*\omega) = \frac{1}{3}(xz + z^2 - y^2 + yz) dx + \frac{1}{3}(xy - 2xz - yz) dy + \frac{1}{3}(xy + y^2 - x^2 - xz) dz$$

Teraz należałoby sprawdzić, że to jest dobra forma pierwotna, bo lemat Poincare jest błędenny. Założmy, że to sprawdziliśmy i się zgadza.

Pytano o potencjał wektorowy, więc musimy przejść do postaci wektorowej.

$$A = G^{-1}(\alpha)$$

Na szczęście we współrzędnych kartezjańskich iloczyn G i G^{-1} są takie same, zatem:

$$A = \frac{1}{3}(xz + z^2 - y^2 + yz) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{3}(xy - 2xz - yz) \frac{\partial}{\partial y} + \frac{1}{3}(xy + y^2 - x^2 - xz) \frac{\partial}{\partial z}$$

Definicja 2 (Ściąganie do punktu a). Uwaga! Jeśli nie ściągamy do punktu 0, tylko $a \in \mathbb{R}^n$, to odwzorowanie ściągające definiujemy następująco:

$$[0, 1] \times O \ni (t, x) \xrightarrow{F} a + t(x - a) \in O$$

Wstęp do twierdzenia Stokesa

Zacznijmy od rachunku motywacyjnego. Jesteśmy na \mathbb{R}^2 . Biorę jakąkolwiek 1-formę.

$$\begin{aligned}\alpha &= f(x, y) dx + g(x, y) dy \\ d\alpha &= [g_x(x, y) - f_y(x, y)] dx \wedge dy\end{aligned}$$

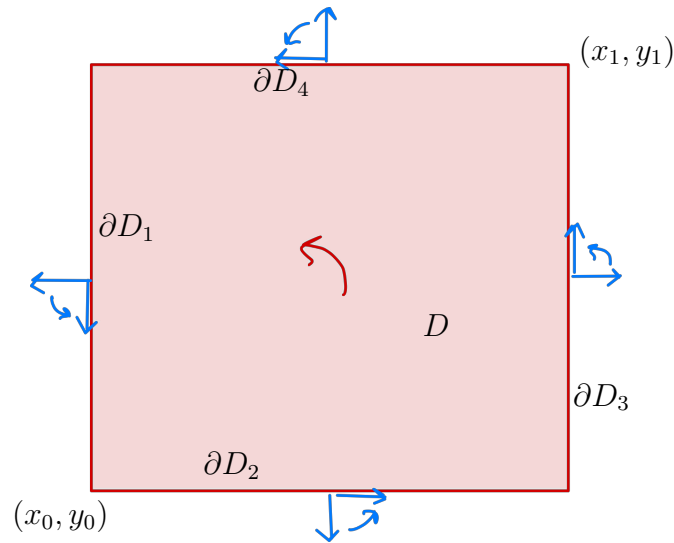
Będziemy liczyli całkę z tej formy po prostokącie.

$$\begin{aligned}\int_{(D,+)} d\alpha &= \int_{(D,+)} [g_x - f_y] dx \wedge dy \\ &= \int_D (g_x - f_y) dx dy \\ &= \int_D g_x dx \wedge dy - \int_D f_y dx dy \\ &= \int_{y_0}^{y_1} dy \int_{x_0}^{x_1} g_x(x, y) dx - \int_{x_0}^{x_1} dx \int_{y_0}^{y_1} f_y dy \\ &= \int_{y_0}^{y_1} dy [g(x_1, y) - g(x_0, y)] - \int_{x_0}^{x_1} dx [f(x, y_1) - f(x, y_0)] \\ &= \int_{y_0}^{y_1} g(x_1, y) dy + \int_{y_1}^{y_0} g(x_0, y) dy + \int_{x_1}^{x_0} f(x_1, y) dx + \int_{x_0}^{x_1} f(x, y_0) dx\end{aligned}$$

Jak się spojrzy to widać, że odpowiednie całki odpowiadają całkowaniu po brzegach naszego prostokąta.

$$= \int_{(\partial D_3, \partial +)} \alpha + \int_{(\partial D_1, \partial +)} \alpha + \int_{(\partial D_4, \partial +)} \alpha + \int_{(\partial D_2, \partial +)} \alpha$$

Orientację dobieramy tak, że pierwszy wektor rysuję na zewnątrz obszaru, dobieram drugi tak by orientacja była taka sama jak wyjściowa, wtedy drugi wektor wskazuje kierunek całkowania.



Rysunek 1.6: prostokąt

Twierdzenie 3 (Twierdzenie Stokesa). Niech M będzie zwartą zorientowaną powierzchnią z brzegiem wymiaru n i niech ω będzie $(n-1)$ -formą na M . Wówczas,

$$\int_{(M, \iota)} d\omega = \int_{(\partial M, \partial \iota)} \omega$$

Wykład 4: Twierdzenie Stokesa

26 paź 2020

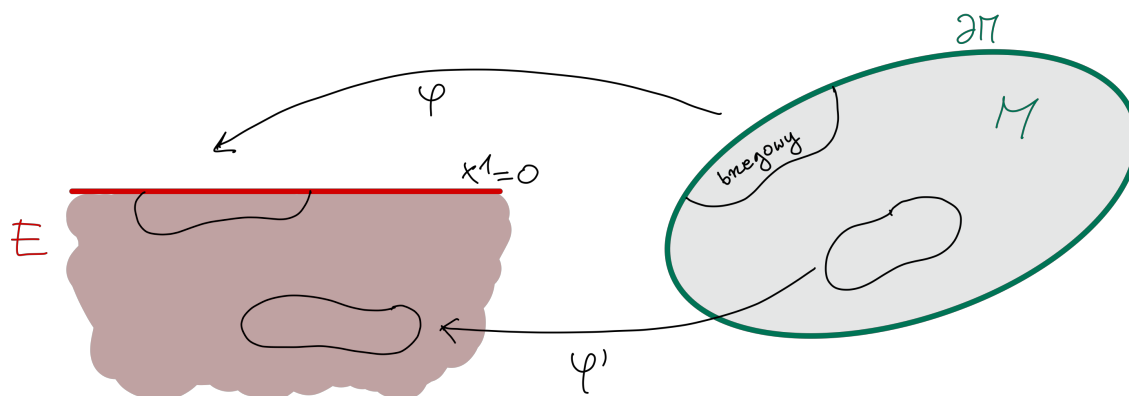
Rozmaitość z brzegiem

Wzorcową rozmaitość z brzegiem nazwalibyśmy podzbiór $E \subset \mathbb{R}^n$: $E = \{(x^1, \dots, x^n) : x^1 \leq 0\}$, gdzie zbiory otwarte w E to zbiory otwarte w \mathbb{R}^n przecięte z E . Brzeg takiej rozmaitości określilibyśmy jako $\partial E = \{x^1 = 0\}$. Możemy mieć dwa typy zbiorów otwartych:

- $O \cap E = O$ (zwykły)
- $U \cap E \neq U$ (zawiera kawałek brzegu)

Dwa typy zbiorów otwartych odpowiadają dwóm typom układów współrzędnych – brzegowy lub wewnętrzny.

Definicja 3 (Gładka rozmaitość z brzegiem). M jest gładką rozmaitością z brzegiem, jeśli dla każdego $q \in M$ istnieją zbiory otwarte $V \subset M$ i $U \subset E$ oraz homeomorfizm $\phi: V \rightarrow U$ taki, że jeśli $V \cap V' \neq \emptyset$, odwzorowanie $\phi' \circ \phi^{-1}$ jest gładkie tam, gdzie określone.



Rysunek 1.7: Rozmaitość z brzegiem.

Wniosek 2. ∂M jest gładką rozmaitością bez brzegu.

Dowód. Jeśli $(V_\alpha, \phi_\alpha)_{\alpha \in A}$ jest atlasem na M , to możemy wybrać tylko te układy brzegowe i zdefiniować otwarte pokrycie brzegu: $(\tilde{V}_\beta, \phi_\beta)_{\beta \in B}$ gdzie $\tilde{V}_\beta = V_\beta \cap \partial M$, $B = \{\alpha \in A : V_\alpha \cap \partial M \neq \emptyset\}$ jest atlasem ∂M . Dostajemy zwyczajną rozmaitość z wymiarem o 1 mniejszym. ■

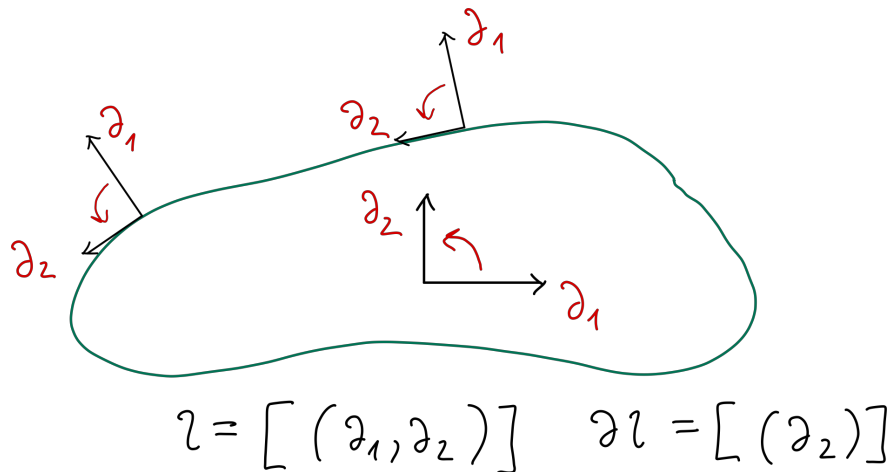
Twierdzenie 4. M jest orientowalna, czyli można wybrać na niej atlas zgodny – takie pokrycie dziedzinami układów współrzędnych, że macierze przejścia między poszczególnymi bazami mają dodatni wyznacznik. Wówczas ∂M też jest orientowalna.

Dowód. Bierzymy dowolne dwa układy brzegowe, o pewnym przecięciu. Obcinamy je do samego brzegu i patrzymy czy wyznacznik macierzy przejścia między nimi jest dodatni. Macierz przejścia to obcięta macierz przejścia między całymi układami na M o cały pierwszy rząd i kolumnę ($x^1 = 0 = y^1$). Skoro cała wyjściowa macierz ma dodatni wyznacznik i a_{11} jest dodatnie, to cała obcięta podmacierz też ma dodatni wyznacznik. ■

Skoro ∂M też jest orientowalna, to opisujemy orientację indukowaną jako tą, która powstaje poprzez usunięcie pierwszych współrzędnych x^1, y^1 .

Definicja 4 (Orientacja indukowana). Posługując się klasami równoważności,

$$\begin{aligned} \iota &= [(\partial_{x^1}, \partial_{x^2}, \dots, \partial_{x^n})] \\ \partial \iota &= [(\partial_{x^2}, \dots, \partial_{x^n})] \end{aligned}$$



Rysunek 1.8: Orientacja 1-wymiarowego brzegu.

Gładki rozkład jedności

Definicja 5. Gładkim rozkładem jedności na M związanym z atlasem $(O_i, \phi_i)_{i \in I}$ nazywamy układ gładkich funkcji $(\alpha_i)_{i \in I}$ o własnościach:

1. $\text{supp } \alpha_i \subset O_i$
2. każdy punkt $q \in M$ ma otoczenie U takie, że $U \cap \text{supp } \alpha_i \neq \emptyset$ jedynie dla skończonej liczby indeksów i .
3. $0 \leq \alpha_i \leq 1, \forall p \in M \sum_{i \in I} \alpha_i(p) = 1$

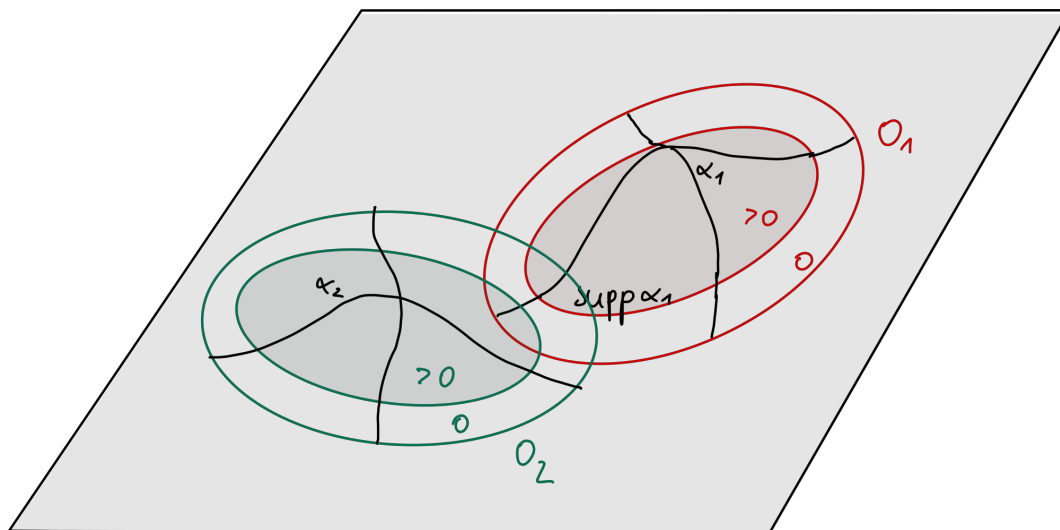
Definicja 6 (Rozmaitość parazwarta). Dla każdego pokrycia otwartego istnieje drobniejsze od niego pokrycie lokalnie skończone – każdy punkt rozmaitości ma otoczenie otwarte, które ma niepusty przekrój jedynie ze skończoną liczbą elementów tego pokrycia.

Twierdzenie 5 (bez dowodu). Na rozmaitości parazwartej istnieje gładki rozkład jedności.

Gładki rozkład jedności może się nam przydać do całkowania po dużych obszarach. Co jeśli obszar całkowania D nie mieści się całkowicie w jednym układzie współrzędnych?

$$\int_{(D, i)} \omega = \int_{(D, i)} \omega \sum_{j \in J} \alpha_j = \sum_{j \in J} \int_{(O_j \cap D, i)} \alpha_j \omega$$

gdzie $O_j \cap D \neq \emptyset$ jedynie dla skończonej liczby indeksów, bo D jest zwarty.



Rysunek 1.9: Gładki rozkład jedności.

Ciekawostka Do konstrukcji gładkich rozkładów jedności używa się funkcji gładkich o zwartym nośniku, takich jak:

$$h(x) = \begin{cases} \exp\left(\frac{1}{(x-1)(x-2)}\right), & x \in (1, 2) \\ 0, & x \notin (1, 2) \end{cases}$$

Dowód twierdzenia Stokesa

Niech M będzie zwartą rozmaitością z brzegiem. $(O_i, \phi_i)_{i \in I}$ jest skończonym atlasem zgodnym, z orientacją. Mamy też odpowiedni rozkład jedności $(\alpha_i)_{i \in I}$.

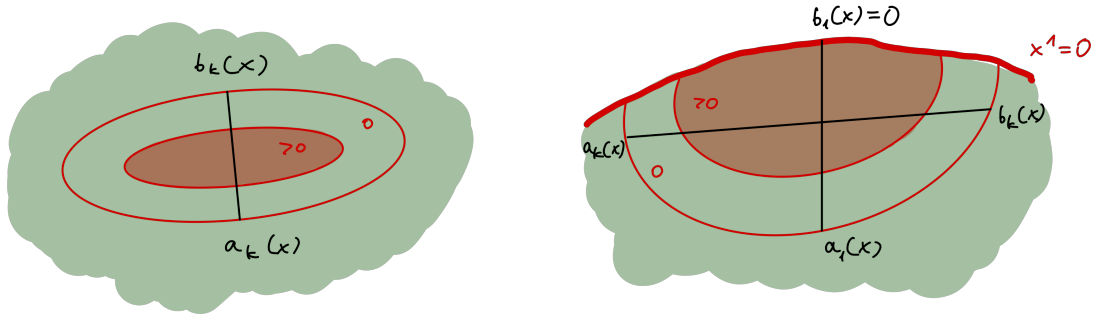
Dowód.

$$\begin{aligned} d\omega &= d(1 \cdot \omega) = d\left(\omega \sum \alpha_i\right) = \sum_i d(\alpha_i \omega) \\ \int_{(M, \iota)} d\omega &= \sum \int_{(O_i, \iota)} d(\alpha_i \omega) \end{aligned}$$

Różniczkowane formy można zapisać w odpowiednich układach współrzędnych. $\alpha_i \omega = f_k^i(x) dx_i^1 \wedge \dots \wedge dx_i^n$, gdzie indeks k oznacza, że nie ma dx_i^k . Dla każdego i liczymy osobno.

$$\begin{aligned} \int_{(\phi_i(O_i), \iota)} d\left(f_k^i(x) dx^1 \wedge \dots \wedge dx^n\right) &= \int_{(\phi_i(O_i), \iota)} \sum_k (-1)^{k-1} \frac{\partial f_k^i}{\partial x^k} dx^1 \wedge \dots \wedge dx^k \wedge \dots \wedge dx^n \\ &= \sum_k (-1)^{k-1} \int_{\phi_i(O_i)} \frac{\partial f_k^i}{\partial x^k} dx^1 \dots dx^n \\ &= \sum_k (-1)^{k-1} \int_{D_k} \underbrace{dx^1 \dots dx^n}_{\text{bez } x^k} \int_{a_k(x^2, \dots)}^{b_k(x^2, \dots)} \frac{\partial f_k^i}{\partial x^k} dx^k = (*) \end{aligned}$$

Jeśli układ współrzędnych jest wewnętrzny, to $f_k^i = 0$ poza zwartym zbiorem, czyli na granicach całkowania. Tak samo wygląda sytuacja, gdy układ jest brzegowy, ale całkujemy po zmiennej innej niż x^1 . Wkład niezerowy dostajemy więc tylko dla układu brzegowego i $k = 1$.



Rysunek 1.10: Możliwe obszary i granice całkowania.

Zobaczmy co się dzieje dla $k = 1$. Wówczas całkować kończymy na brzegu, zatem $b_k(x) = b_1(x) = 0$.

$$\int_{D_1} dx^2 \cdots dx^n \int_{a_1(x)}^{b_1(x)} \frac{\partial f_1^i}{\partial x^1} dx^1 = \int_{D_1} dx^2 \cdots dx^n f_1^i(0, x^2, \dots, x^n)$$

$$\int_{(M,i)} d\omega = \sum_i (*) = \sum_i \int_{\phi_i(O_i) \cap \{x^1=0\}} f_1^i(0, x^2, \dots, x^n) dx^2 \cdots dx^n$$

Rozkład jedności obcięty do brzegu jest rozkładem jedności na brzegu.

$$= \sum_i \int_{(O_i \cap \partial M, \partial i)} (\alpha_i \omega)(0, \dots)$$

$$= \int_{(\partial M, \partial i)} \omega$$

■

Klasyczne wersje twierdzenia Stokesa

Definicja 7 (Klasyczne operatory). Niech $\Omega = \sqrt{\det G} dx^1 \wedge \cdots \wedge dx^n$ będzie formą objętości.

Gradient $\text{grad}(f)$:

$$\text{grad}(f) = G^{-1} \circ df$$

Dywergencja $\text{div}(X)$:

$$\text{div}(X)\Omega = d(X \lrcorner \Omega)$$

Rotacja $\text{rot}(A)$:

$$\text{rot}(A) \lrcorner \Omega = d(G \circ A)$$

Laplasjan Δf :

$$(\Delta f)\Omega = d[(G^{-1} \circ df) \lrcorner \Omega]$$

Twierdzenie Gaussa-Ostrogradskiego-Greena

$$\int_D \text{div } X \, d\vartheta = \int_{\partial D} (\vec{n} \mid X) \, d\sigma$$

gdzie $\dim D = 3$.

Dowód. Przetłumaczamy pojawiające się wyrażenia na język form różniczkowych.

$d\vartheta$ – element objętości, czyli forma objętości Ω ,

$d\sigma$ – element powierzchni, czyli forma objętości na powierzchni związana z $g|_{\partial D}$ i orientacją indukowaną – Σ . Wzór przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} \int_{(D, \imath)} (\text{div } X)\Omega &= \int_{(\partial D, \partial \imath)} (\vec{n} \mid X)\Sigma \\ \int_{(D, \imath)} (\text{div } X)\Omega &= \int_{(D, \imath)} d(X \lrcorner \Omega) \stackrel{\text{Stokes}}{=} \int_{(\partial D, \partial \imath)} X \lrcorner \Omega \end{aligned}$$

Formy objętości definiujemy we współrzędnych. Wybierzmy współrzędne takie, że w dziedzinie O układu mamy:

$$O \cap \partial D = \{x^1 = 0\}, \quad \vec{n} = \frac{\partial}{\partial x^1}, \quad \left(\frac{\partial}{\partial x^1} \mid \frac{\partial}{\partial x^i} \right) = 0$$

dla $i > 1$. Jeśli nie uda się to na całym D , to korzystamy wówczas z rozkładu jedności.

$$\begin{aligned} \Omega &= \sqrt{\det G} dx^1 \wedge \cdots \wedge dx^n \\ \Sigma &= \sqrt{\det G|_{\partial D}} dx^2 \wedge \cdots \wedge dx^n \end{aligned}$$

Oba wyznaczniki są jednak równe.

$$X \lrcorner \Omega = \sqrt{\det G} (X^1 dx^2 \wedge \cdots \wedge dx^n - X^2 dx^1 \wedge dx^3 \wedge \cdots \wedge dx^n + \cdots)$$

Wszystkie człony z dx^1 są zerowe, bo obcięliśmy do $x^1 = 0$.

$$\begin{aligned}\int_{(\partial D, \partial \iota)} X \lrcorner \Omega &= \int_{(\partial D, \partial \iota)} X^1 \sqrt{\det G} dx^2 \wedge \cdots \wedge dx^n \\ &= \int_{(\partial D, \partial \iota)} (\vec{n} \mid X) \Sigma = \int_{\partial D} (\vec{n} \mid X) d\sigma\end{aligned}$$

■

Klasyczne twierdzenie Stokesa

$$\int_S (\vec{n} \mid \operatorname{rot} X) d\sigma = \int_{\partial S} (\vec{t} \mid X) dl$$

gdzie $\dim S = 2$, \vec{n} jest wektorem normalnym do powierzchni, \vec{t} wektorem stycznym do krzywej będącej brzegiem powierzchni, a dl elementem długości tej krzywej.

Dowód. Dowodząc poprzedniego twierdzenia udało nam się ustalić, że:

$$\int_S (\vec{n} \mid A) d\sigma = \int_{(S, \iota)} A \lrcorner \Omega$$

Weźmy więc $A = \operatorname{rot} X$.

$$\begin{aligned}\int_S (\vec{n} \mid \operatorname{rot} X) d\sigma &= \int_{(S, \iota)} \operatorname{rot} X \lrcorner \Omega = \int_{(S, \iota)} d(G \circ X) \\ &\stackrel{\text{Stokes}}{=} \int_{(\partial S, \partial \iota)} G \circ X\end{aligned}$$

Weźmy dowolny układ współrzędnych i rozpiszmy: $G \circ X = g_{ij} X^i dx^j$. Wybierzmy również parametryzację brzegu, zgodną z orientacją: $I \ni r \mapsto (x^1(r), x^2(r), x^3(r)) \in \partial S$.

$$\int_{(\partial S, \partial \iota)} G \circ X = \int_I g_{ij}(r) X^i(r) \dot{x}^j dr$$

Policzmy jednostkowy wektor styczny \vec{t} i inne pojawiające się wyrażenia:

$$\begin{aligned}\partial_r &= \dot{x}^1 \partial_1 + \dot{x}^2 \partial_2 + \dot{x}^3 \partial_3 = \|\partial_r\| \vec{t} \\ g_{ij} X^i \dot{x}^j &= (X \mid \partial_r) = (X \mid \vec{t}) \|\partial_r\| \\ dl &= \|\partial_r\| dr\end{aligned}$$

Stąd,

$$\int_{(\partial S, \partial \iota)} G \circ X = \int_I (\vec{t} \mid X) \|\partial_r\| dr = \int_{\partial S} (\vec{t} \mid X) dl$$

■

Wzory Greena

$$\begin{aligned}\int_D (\text{grad } f \mid \text{grad } h) \, d\vartheta &= - \int_D f \Delta h \, d\vartheta + \int_{\partial D} f(\vec{n} \mid \text{grad } h) \, d\sigma \\ \int_D (f \Delta h - h \Delta f) \, d\vartheta &= \int_{\partial D} [f(\vec{n} \mid \text{grad } h) - h(\vec{n} \mid \text{grad } f)] \, d\sigma\end{aligned}$$

Dowód. Wzór drugi jest trywialnym następstwem pierwszego, skupimy się więc na udowodnieniu pierwszego z nich.

$$\int_{\partial D} f(\vec{n} \mid \text{grad } h) \, d\sigma = \int_{\partial D} (\vec{n} \mid f \text{ grad } h) \, d\sigma$$

Z twierdzenia, Ostrogradskiego-Greena,

$$= \int_D \text{div}(f \text{ grad } h) \, d\vartheta$$

Przyjrzyjmy się tej dywergencji,

$$\text{div}(fX)\Omega = d[(fX) \lrcorner \Omega] = d[f(X \lrcorner \Omega)] = df \wedge (X \lrcorner \Omega) + f d(X \lrcorner \Omega)$$

Przyjrzyjmy się pewnemu wyrażeniu, które się zaraz przyda:

$$0 = X \lrcorner (df \wedge \Omega) = \langle df, X \rangle \Omega - df \wedge (X \lrcorner \Omega)$$

Stąd, w wyżej rozważanej dywergencji rozpoznajemy,

$$\text{div}(fX)\Omega = \langle df, X \rangle \Omega + f \text{div}(X)\Omega$$

Teraz można przekształcić całkę.

$$\begin{aligned}\int_D \text{div}(f \text{ grad } h) \, d\vartheta &= \int_D \langle df, \text{grad } h \rangle \, d\vartheta + \int_D f \text{div grad } h \, d\vartheta \\ &= \int_D (\text{grad } f \mid \text{grad } h) \, d\vartheta + \int_D f \Delta h \, d\vartheta\end{aligned}$$

■

Rozdział 2

Analiza zespolona

Wykład 5: Różniczkowanie w sensie zespolonym

30 paź 2020

Przekształcenia \mathbb{C} -liniowe

\mathbb{C} można traktować jak dwuwymiarową przestrzeń wektorową nad \mathbb{R} lub jednowymiarową przestrzeń wektorową nad \mathbb{C} . \mathbb{C} jako zbiór to jest \mathbb{R}^2 , zatem:

$$\begin{aligned} f: \mathbb{C} &\rightarrow \mathbb{C} & f(x + iy) &= u(x, y) + iv(x, y) \\ f: \mathbb{R}^2 &\rightarrow \mathbb{R}^2 & f(x, y) &= (u(x, y), v(x, y)) \end{aligned}$$

Jak różniczkować funkcje $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ doskonale wiemy.

$$f(x + \delta x, y + \delta y) = f(x, y) + f'(x, y) \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} + R(\dots)$$

Ta pochodna to jest odwzorowanie $L(\mathbb{R}^2, \mathbb{R}^2)$, czyli macierz 2×2 . Ale można też na to spojrzeć w ujęciu 1-wymiarowej przestrzeni nad \mathbb{C} . Odwzorowania liniowe $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ polegają na mnożeniu przez liczbę zespoloną: $z \mapsto wz$. Każde odwzorowanie \mathbb{C} -liniowe jest \mathbb{R} -liniowe. Niech $w = a + ib$, $z = x + iy$.

$$x + iy \mapsto (a + ib)(x + iy) = (ax - by) + i(ay + bx)$$

Spróbujmy to zapisać jako mnożenie macierzy.

$$\begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ax - by \\ ay + bx \end{bmatrix}$$

Czyli odwzorowania \mathbb{C} -liniowe to są szczególne odwzorowania \mathbb{R} -liniowe zapisane takimi macierzami.

$$\begin{aligned} \psi: \mathbb{C} &\rightarrow L(\mathbb{R}^2, \mathbb{R}^2) = M_{2 \times 2}(\mathbb{R}) \\ a + ib &\mapsto \begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Odwzorowanie to ma szczególne własności:

$$\det(\psi(a + ib)) = |a + ib|^2$$
$$\psi(a + ib) = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

Innymi słowy, jest to skalowanie + obrót, tzn. złożenie jednokładności z obrotem.

Różniczkowanie w sensie rzeczywistym i zespolonym

Z punktu widzenia rzeczywistego, możemy zapisać:

$$f(x + \delta x + i(y + \delta y)) = f(x + iy) + f'(x + iy) \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} + R(x + iy, \delta x + i\delta y)$$
$$f'(x + iy) = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix}$$

Definicja 8 (Różniczkowalność w sensie rzeczywistym). f jest różniczkowalna w punkcie $z = x + iy$ (w sensie rzeczywistym) jeśli istnieje $f'(z)$, czyli odwzorowanie \mathbb{R} -liniowe $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ takie, że reszta spełnia:

$$\frac{|R(x + iy, \delta x + i\delta y)|}{|\delta x + i\delta y|} \xrightarrow{\delta x + i\delta y \rightarrow 0} 0$$

Definicja 9 (Różniczkowalność w sensie zespolonym). f jest różniczkowalna w sensie zespolonym w $z = x + iy$ jeśli jest różniczkowalna w sensie rzeczywistym i $f'(z)$ jest odwzorowaniem \mathbb{C} -liniowym.

Oznacza to, że:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x}$$

Te dwie równości nazywamy warunkami Cauchy'ego-Riemanna. Wówczas,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \longleftrightarrow \begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix}$$
$$f'(z) = a + ib = \frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} - i \frac{\partial u}{\partial y} = \dots$$

Przykład $f: z \mapsto z^2$

$$(x + iy)^2 = \underbrace{(x^2 - y^2)}_{u(x,y)} + i \underbrace{2xy}_{v(x,y)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 2x, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = -2y, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 2y, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 2x$$

$$f'(z) = \begin{bmatrix} 2x & -2y \\ 2y & 2x \end{bmatrix}$$

$$f'(z) = 2x + i2y = 2z$$

Czyli de facto,

$$(z^2)' = 2z$$

Czy działa stary wzór na pochodną z granicą ilorazu różnicowego? Na \mathbb{R}^2 iloraz różnicowy niezbyt da się zapisać, ale na \mathbb{C} już tak. Pytamy czy:

$$f'(z) = \lim_{\delta z \rightarrow 0} \frac{f(z + \delta z) - f(z)}{\delta z}$$

Okazuje się, że rzeczywiście ten wzór działa.

Twierdzenie 6. f jest różniczkowalna w sensie zespolonym w punkcie $z \iff$ istnieje granica ilorazu różnicowego. Wówczas granica ta jest pochodną $f'(z)$.

Dowód. Najpierw w prawo.

$$f(z + \delta z) = f(z) + f'(z)\delta z + R(z, \delta z)$$

$$f(z + \delta z) - f(z) = f'(z)\delta z + R(z, \delta z)$$

$$\frac{f(z + \delta z) - f(z)}{\delta z} = f'(z) + \frac{R(z, \delta z)}{\delta z}$$

Teraz chcemy przejść do granicy przy $\delta z \rightarrow 0$. Wiadomo, że wartość bezwzględna tej reszty rzeczywiście dąży do 0.

$$\left| \frac{R(z, \delta z)}{\delta z} \right| \xrightarrow{\delta z \rightarrow 0} 0$$

Jednakże jeśli moduł liczby zespolonej dąży do zera to również sama liczba zespolona dąży do zera. Stąd,

$$\lim_{\delta z \rightarrow 0} \frac{f(z + \delta z) - f(z)}{\delta z} = f'(z)$$

Teraz dowodzimy w drugą stronę. Załóżmy, że:

$$\begin{aligned} w &= \lim_{\delta z \rightarrow 0} \frac{f(z + \delta z) - f(z)}{\delta z} \\ \forall \varepsilon > 0 \exists \Delta > 0: |\delta z| < \Delta &\implies \left| w - \frac{f(z + \delta z) - f(z)}{\delta z} \right| < \varepsilon \\ &\implies \left| \frac{1}{\delta z} (w\delta z - f(z + \delta z) + f(z)) \right| < \varepsilon \\ &\implies \left| \underbrace{f(z + \delta z) - f(z) - w\delta z}_{R(z, \delta z)} \right| < \varepsilon \delta z \end{aligned}$$

Wynika stąd, że $R(z, \delta z) \in K(0, \varepsilon \delta z)$, czyli $\frac{R(z, \delta z)}{\delta z} \in K(0, \varepsilon)$. Oznacza to, że w granicy:

$$\left| \frac{R(z, \delta z)}{\delta z} \right| < \varepsilon$$

Jest to tożsame z warunkiem zanikania reszty, zatem funkcja jest różniczkowalna w sensie rzeczywistym oraz $f'(z) = w$. Ponieważ ta pochodna jest mnożeniem przez liczbę zespoloną to widzimy, że spełniony jest warunek różniczkowalności w sensie zespolonym. ■

Przykłady

$$\begin{aligned} z &\mapsto z^3 \\ \frac{(z + \delta z)^3 - z^3}{\delta z} &= \frac{3z^2\delta z + 3z(\delta z)^2 + (\delta z)^3}{\delta z} = 3z^2 + 3z\delta z + (\delta z)^2 \\ &\rightarrow 3z^2 \end{aligned}$$

Wszystko przebiega tak samo jak było w \mathbb{R} . Sprawdźmy teraz funkcję „specyficzną” zespoloną.

$$\begin{aligned} z &\mapsto \bar{z} \\ \frac{\overline{z + \delta z} - \bar{z}}{\delta z} &= \frac{\bar{z} + \overline{\delta z} - \bar{z}}{\delta z} = \frac{\overline{\delta z}}{\delta z} \end{aligned}$$

I teraz tutaj może być różnie. Jeśli $\delta z = \delta x$, czyli jeśli zmierzamy wzdłuż osi rzeczywistej, to zmierzamy do 1. Jeśli natomiast $\delta z = i\delta y$, to

$$\frac{\overline{\delta z}}{\delta z} = \frac{-i\delta y}{i\delta y} = -1$$

Stąd wniosek, że ta pochodna nie istnieje. W sensie zespolonym funkcja ta nie jest różniczkowalna, natomiast w sensie rzeczywistym jest.

Definicja 10 (Funkcja holomorficzna). Funkcję różniczkowalną w sensie zespolonym w każdym punkcie obszaru otwartego Ω nazywamy holomorficzną na Ω . Zbiór funkcji holomorficzych oznaczamy przez $\mathcal{A}(\Omega)$.

Wniosek 3. Obowiązują „zwykłe” prawa różniczkowania, znane z \mathbb{R} .

Wniosek 4. $f \in \mathcal{A}(\Omega)$ jest bijekcją, to $f^{-1} \in \mathcal{A}(f(\Omega))$.

Z twierdzenia o lokalnej odwracalności dla reprezentacji $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, f^{-1} jest różniczkowalna w sensie rzeczywistym oraz $(f^{-1})'(w) = 1/f'(z)$, $w = f(z)$. Trzeba jeszcze wtedy sprawdzić, że macierz $1/f'(z)$ również odpowiada mnożeniu przez liczbę zespoloną.

Operatory $\partial/\partial z$, $\partial/\partial \bar{z}$

Będziemy myśleć o $\mathbb{C} = \mathbb{R}^2$. W tym \mathbb{R}^2 mamy kanoniczny układ współrzędnych (x, y) . W każdym punkcie $z = (x, y) = x + iy$ możemy rozważyć przestrzeń styczną $T_z \mathbb{R}^2 = T_z \mathbb{C} = \left\langle \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right\rangle$. Jest to rzeczywista przestrzeń wektorowa.

Druga interpretacja – wektory styczne to pewne operatory różniczkowania działające na funkcje $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Czy da się je rozszerzyć na funkcje o wartościach zespolonych? Musi zachodzić podstawowy warunek:

$$D(fg) = D(f)g + fD(g)$$

Weźmy $f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$, $g(z) = U(x, y) + iV(x, y)$. Zdefiniujmy sobie:

$$\frac{\partial}{\partial x} f = \frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x}$$

Zaczynamy sprawdzać:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(fg) &= \frac{\partial}{\partial x}[(u + iv)(U + iV)] = \frac{\partial}{\partial x}[uU - vV + i(uV + vU)] \\ &= \frac{\partial u}{\partial x}U + u \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial x}V - v \frac{\partial V}{\partial x} + i \left[\frac{\partial u}{\partial x}V + u \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x}U + v \frac{\partial U}{\partial x} \right] \\ &= \left(\frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} \right) U + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} \right) (iV) + (u + iv) \frac{\partial U}{\partial x} + (u + iv) \frac{\partial V}{\partial x} i \\ &= \left(\frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} \right) (U + iV) + (u + iv) \left(\frac{\partial U}{\partial x} + i \frac{\partial V}{\partial x} \right) \\ &= \frac{\partial f}{\partial x} g + f \frac{\partial g}{\partial x} \end{aligned}$$

Udało nam się więc rozszerzyć $\partial/\partial x$ na funkcje o wartościach w \mathbb{C} .

Wykład 6: Funkcje holomorficzne

02 lis 2020

Definicja 11 (Kompleksyfikacja). Niech V będzie przestrzenią wektorową nad \mathbb{R} wymiaru $\dim_{\mathbb{R}} V = n$. W iloczynie kartezjańskim $V \times V$ wprowadzamy mnożenie przez liczbę zespoloną:

$$\begin{aligned} (x + iy)(v, w) &= (xv - yw, yv + xw) \\ V^{\mathbb{C}} &= (V \times V, \mathbb{C}, \circ, +) \end{aligned}$$

$$(T_z \mathbb{C})^{\mathbb{C}} = \left\langle \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right\rangle = \left\langle \frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y} \right\rangle$$

Weźmy $f \in \mathcal{A}(\Omega)$, $f = u + iv$. Liczymy,

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} \right) (u + iv) &= \frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial u}{\partial y} + i \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \\ &= \underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)}_0 + i \underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)}_0 = 0 \\ \left(\frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y} \right) (u + iv) &= \frac{\partial u}{\partial x} - i \frac{\partial u}{\partial y} = i \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \\ &= \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + i \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ &= 2 \frac{\partial u}{\partial x} - 2i \frac{\partial u}{\partial y} \\ &= 2f'(z) \end{aligned}$$

Stąd wynika pomysł, by wprowadzić oznaczenie:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial}{\partial \bar{z}} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

Wówczas, $\partial f / \partial z = f'(z)$ oraz $\partial f / \partial \bar{z} = 0$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial}{\partial \bar{z}} f &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial}{\partial \bar{z}} &= \frac{1}{4} \left(\frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} \right) \\ &= \frac{1}{4} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + i \left(\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} \right) \right) \end{aligned}$$

Pochodne mieszane się zerują, zatem

$$= \frac{1}{4} \Delta$$

Stąd,

$$\Delta f = \Delta u + i \Delta v$$

Część rzeczywista i urojona laplasjanu funkcji holomorficznych znika i takie funkcje u, v na \mathbb{R}^2 nazywamy harmonicznymi.

Baza dualna przestrzeni i formy na \mathbb{C}

Jak będzie wyglądała baza dualna? Niech $a, c \in \mathbb{C}$. Nakładamy warunki, by:

$$\begin{aligned} 1 &= \langle a dx + b dy, \partial_z \rangle = \frac{1}{2}(a - ib) \\ 0 &= \langle a dx + b dy, \partial_{\bar{z}} \rangle = \frac{1}{2}(a + ib) \end{aligned}$$

Po rozwiązaniu, $a = 1$, $b = i$ a zatem:

$$dz = dx + i dy$$

Analogicznie,

$$d\bar{z} = dx - i dy$$

Taka jest baza przestrzeni dualnej. Możemy więc myśleć o formach o wartościach zespolonych, całkować je po krzywych. Możemy też różniczkować zewnętrznym. Rozważmy to.

Weźmy $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ różniczkowalną w sensie rzeczywistym.

$$\begin{aligned} df &= d(u(x, y) + iv(x, y)) = \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + i \frac{\partial v}{\partial x} dx + i \frac{\partial v}{\partial y} dy \\ &= \left(\frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} \right) dx + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + i \frac{\partial v}{\partial y} \right) dy \end{aligned}$$

Podmieniamy dx, dy na bazy dualne.

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} - i \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] dz + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} + i \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial y} \right] d\bar{z} \\ &= \left[\frac{\partial u}{\partial z} + i \frac{\partial v}{\partial z} \right] dz + \left[\frac{\partial u}{\partial \bar{z}} + i \frac{\partial v}{\partial \bar{z}} \right] d\bar{z} \\ &= \frac{\partial f}{\partial z} dz + \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} d\bar{z} \end{aligned}$$

Widzimy, że algebraicznie to wszystko się nam pięknie zbiera do czegoś co intuicyjnie ma dla nas sens. Co jeśli f byłaby holomorficzna? Wówczas $\partial f / \partial \bar{z} = 0$, zatem

$$df = \frac{\partial f}{\partial z} dz$$

Wiemy już, że możemy różniczkować formy. Zastanówmy się, czy możemy je całkować.

Przykład Weźmy formę/funkcję $f(z) = z^2 dz$. Mamy krzywą γ , będącą ćwiartką okręgu jednostkowego $r(t) = e^{it}$, $t \in [0, \frac{\pi}{2}]$.

$$\begin{aligned} \int_{\gamma} z^2 dz &= \int_0^{\pi/2} (e^{it})^2 d(e^{it}) = \int_0^{\pi/2} e^{2it} i e^{it} dt \\ &= i \int_0^{\pi/2} e^{3it} dt \\ &= i \int_0^{\pi/2} (\cos(3t) + i \sin(3t)) dt \\ &= i \left[\frac{1}{3} \sin(3t) \Big|_0^{\pi/2} - \frac{1}{3} i \cos(3t) \Big|_0^{\pi/2} \right] = -\frac{1}{3} i - \frac{1}{3} \end{aligned}$$

Całkowanie funkcji holomorficznych

Teraz policzymy różniczkę szczególnej formy – takiej, której współczynnikiem jest funkcja holomorficzna.

$$\begin{aligned} d(f(z) dz) &= d\left[(u(x, y) + iv(x, y))(dx + i dy)\right] \\ &= d[u dx + iu dy + iv dx - v dy] \\ &= -\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) dx \wedge dy + i\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right) dx \wedge dy \end{aligned}$$

Teraz patrzę, że mam funkcję holomorficzną, czyli:

$$= 0$$

Stąd prosty wniosek.

Wniosek 5. Jeśli $f \in \mathcal{A}(\Omega)$ to $f(z) dz$ jest zamknięta.

Ma to dalekosiężne konsekwencje.

Twierdzenie 7. Niech $f \in \mathcal{A}(\Omega)$. Bierzemy regularny obszar (nadający się do całkowania – zwarty, z brzegiem kawałkami krzywą gładką) $D \subset \Omega$. Wówczas,

$$\oint_{\partial D} f(z) dz = 0$$

Dowód. Z twierdzenia Stokesa:

$$\oint_{\partial D} f(z) dz = \int_{(D,+)} d(f(z) dz) = 0$$

■

Wniosek 6. Niech Ω będzie obszarem jednospójnym. Weźmy $f(z) \in \mathcal{A}(\Omega)$, $a, z \in \Omega$. $\gamma: a \rightarrow z$. Wówczas,

$$\int_{\gamma} f(z) dz$$

nie zależy od krzywej, tylko od końców krzywej.

$$F(z) = \int_a^z f(\zeta) d\zeta$$

Twierdzenie Cauchy'ego

Twierdzenie 8 (Giacinto Morera). Jeśli f jest ciągła na Ω i $\int_a^z f(\zeta) d\zeta$ nie zależy od drogi dla dowolnych $a, z \in \Omega$, to

$$F(z) = \int_a^z f(\zeta) d\zeta$$

jest holomorficzna oraz

$$F'(z) = f(z)$$

Dowód.

$$\begin{aligned} F(z + \delta z) - F(z) &= \int_a^{z+\delta z} f(\zeta) d\zeta - \int_a^z f(\zeta) d\zeta \\ &= \int_z^{z+\delta z} f(\zeta) d\zeta \end{aligned}$$

Niech $\zeta = z + t\delta z$, $t \in [0, 1]$.

$$\begin{aligned} d\zeta &= \delta z dt \\ \frac{F(z + \delta z) - F(z)}{\delta z} &= \frac{1}{\delta z} \int_0^1 f(z + t\delta z) \delta z dt \\ \lim_{\delta z \rightarrow 0} \frac{F(z + \delta z) - F(z)}{\delta z} &= \lim_{\delta z \rightarrow 0} \int_0^1 f(z + t\delta z) dt \end{aligned}$$

Jest to całka zwarta z parametrem. Warunek wejścia z granicą pod znak całki jest taki, żeby f była ciągła jako funkcja trzech zmiennych $(t, \delta x, \delta y)$. Ten warunek jest spełniony z założenia twierdzenia.

$$\begin{aligned} &= \int_0^1 \lim_{\delta z \rightarrow 0} f(z + t\delta z) dt \\ &= \int_0^1 f(z) dt = f(z) \end{aligned}$$

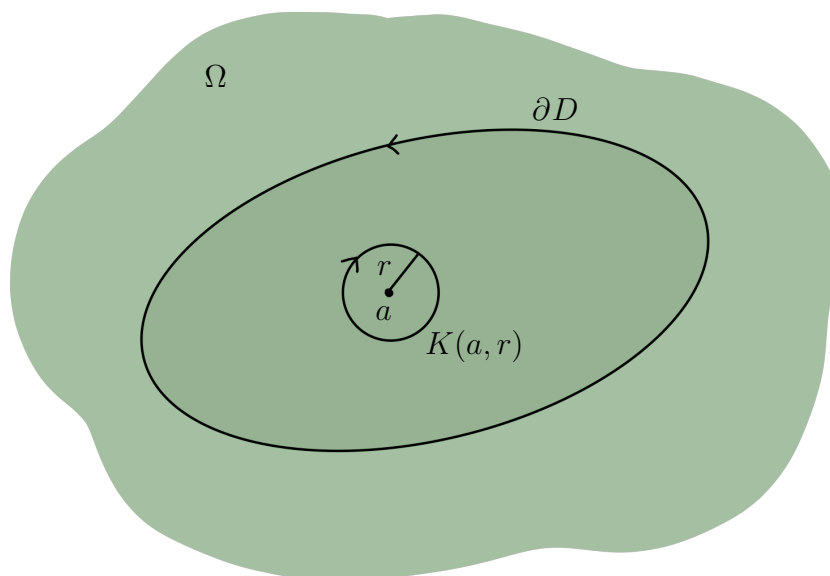
To kończy dowód. ■

Wniosek 7 (Wzór Cauchy'ego). $f \in \mathcal{A}(\Omega)$, $D \subset \Omega$. $a \in \text{Int}(D)$. Wówczas,

$$2\pi i f(a) = \oint_{\partial D} \frac{f(z)}{z - a} dz$$

Dowód.

$$\begin{aligned} \frac{f(z)}{z - a} &\in \mathcal{A}(\Omega \setminus \{a\}) \\ 0 &= \oint_{\partial D} \frac{f(z)}{z - a} dz + \oint_{\partial K(a,r)} \frac{f(z)}{z - a} dz \\ \oint_{\partial D} \frac{f(z)}{z - a} dz &= \oint_{\partial K(a,r)} \frac{f(z)}{z - a} dz \end{aligned}$$



Rysunek 2.1: Wzór Cauchy'ego

Niech $z = a + re^{i\phi}$. $dz = rie^{i\phi} d\phi$.

$$\begin{aligned} &= \int_0^{2\pi} \frac{f(a + re^{i\phi})}{a + re^{i\phi} - a} rie^{i\phi} d\phi \\ &= i \int_0^{2\pi} f(a + re^{i\phi}) d\phi \stackrel{\text{def}}{=} F(r) \end{aligned}$$

Ostatnia całka nie zależy od r , gdyż jakbyśmy całkowali po mniejszym okręgu $C_{a,\rho}$, gdzie $\rho < r$, to obie całki byłyby równe. Stąd $F(r)$ jest stała. Możemy więc w szczególności rozważyć granicę w $r \rightarrow 0$.

$$\begin{aligned} F(r) &= \lim_{r \rightarrow 0} F(r) = \lim_{r \rightarrow 0} i \int_0^{2\pi} f(a + re^{i\phi}) d\phi \\ &= i \int_0^{2\pi} f(a) d\phi = 2\pi i f(a) \end{aligned}$$

To kończy dowód. ■

Znając wartości funkcji na brzegu jestem w stanie wyliczyć wartości funkcji holomorficzej w każdym punkcie wewnątrz obszaru! Funkcje holomorficze są bardzo „sztywne”. Wynika stąd na przykład, że nie istnieją funkcje holomorficze o zwartych nośnikach.

Wykład 7: Własności funkcji holomorficzych

06 lis 2020

Zadanie 1 Mamy kontur $C = \{z \in \mathbb{C} : |z + i| = 3\}$. $C = \partial K(-i, 3)$. Orientację nadajemy dodatnią. Obliczyć całkę $\oint_C \frac{\sin z}{z + i} dz$.

$$\oint_C \frac{\sin z}{z+i} dz = \oint_C \frac{\sin z}{z-(-i)} \stackrel{?}{=} 2\pi i \sin(-i)$$

Można użyć twierdzenia Cauchy'ego, jeśli \sin w dziedzinie zespolonej jest holomorficzny. Zapiszmy to w taki sposób,

$$\begin{aligned}\sin(x+iy) &= \sin(x)\cos(iy) + \cos(x)\sin(iy) \\ \sin \alpha &= \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2} \\ \cos \alpha &= \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i}\end{aligned}$$

Zapostulujmy, że te wzory są również spełnione dla $\alpha \in \mathbb{C}$.

$$\begin{aligned}\cos(iy) &= \frac{e^{-y} + e^y}{2} = \cosh y \\ \sin(iy) &= \frac{e^{-y} - e^y}{2i} = i \sinh y\end{aligned}$$

Stąd,

$$\sin(z) = \underbrace{\sin(x)\cosh(y)}_{u(x,y)} + i \underbrace{\cos(x)\sinh(y)}_{v(x,y)}$$

Sprawdzamy warunki C-R.

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} &= \cos x \cosh y, & \frac{\partial u}{\partial y} &= \sin x \sinh y \\ \frac{\partial v}{\partial x} &= -\sin x \sinh y, & \frac{\partial v}{\partial y} &= \cos x \cosh y\end{aligned}$$

Równania C-R są spełnione, zatem tak zdefiniowana funkcja \sin zmiennej zespolonej jest funkcją holomorficzną. Zadanie zatem sprowadza się do policzenia:

$$\begin{aligned}\sin(-i) &= i \sin(i) = -i \sinh(1) = -i \frac{e - e^{-1}}{2} \\ \oint_C \frac{\sin z}{z-(-i)} &= \pi \left(e - \frac{1}{e} \right)\end{aligned}$$

Zadanie 2 Treningowe wstępne zadanie dotyczące funkcji holomorficzych. Mamy daną $v(x, y) = \frac{y}{(x+1)^2 + y^2}$. Sprawdzić, czy v może być częścią urojonej funkcji holomorficzej? Znaleźć tę funkcję.

To sprawdzenie sprowadza się do sprawdzenia czy $\Delta v = 0$, bo jeśli f jest holomorficzną, to jej części Re oraz Im są harmoniczne. Można sprawdzić, że Laplasjan, rzeczywiście

się zeruje. Przejdźmy od razu do szukania funkcji. Trzeba sprawdzić C-R.

$$\begin{aligned}\frac{\partial v}{\partial x} &= -\frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} &= \frac{-2(x+1)y}{[(x+1)^2 + y^2]^2} = -\frac{\partial u}{\partial y} \\ u(x, y) &= \int \frac{2(x+1)y}{[(x+1)^2 + y^2]^2} dy = (x+1) \int \frac{y dy}{[(x+1)^2 + y^2]^2} \\ &= (x+1) \frac{-1}{(x+1)^2 + y^2} + g(x)\end{aligned}$$

Funkcję g można odnaleźć z drugiego zestawu równań $C - R$.

$$\begin{aligned}\frac{\partial v}{\partial y} &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial x} &= g'(x) - \frac{[(x+1)^2 + y^2] - 2(x+1)(x+1)}{[(x+1)^2 + y^2]^2} \\ &= g'(x) - \frac{y^2 - (x+1)^2}{[(x+1)^2 + y^2]^2}\end{aligned}$$

Porównuję z drugą pochodną,

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{(x+1)^2 + y^2 - 2y^2}{[\dots]^2} = \frac{(x+1)^2 - y^2}{[\dots]^2}$$

Stąd,

$$\begin{aligned}g'(x) &= 0 \\ g(x) &= z_0 \in \mathbb{C}\end{aligned}$$

Wobec tego, jak wygląda nasza funkcja f ?

$$f(x+iy) = \frac{-(x+1)+iy}{(x+1)^2+y^2} + z_0 = \left| \begin{array}{l} x = \frac{1}{2}(z+\bar{z}) \\ y = \frac{1}{2i}(z-\bar{z}) \end{array} \right| =$$

Powinno dać się to sprowadzić do postaci funkcji od $z \in \mathbb{C}$. Jeśli się nie uda, to znaczy, że gdzieś popełniliśmy błąd. My bądźmy sprytniejsi. Zauważmy, że mianownik to moduł z przesuniętej o 1.

$$= \frac{-\overline{(z+1)}}{(z+1)\overline{(z+1)}} + z_0 = \frac{-1}{z+1} + z_0$$

Funkcja ta jest nie określona w punkcie $z = -1$.

n -te pochodne funkcji holomorficzych

Weźmy $f \in \mathcal{A}(\Omega)$, $z \in \Omega$ oraz $\gamma(t) = \zeta(t) + i\eta(t)$, $t \in [a, b]$.

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\gamma} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \frac{1}{2\pi i} \int_a^b \frac{f(\xi(t) + i\eta(t))}{\xi(t) + i\eta(t) - z} (\dot{\xi}(t) + i\dot{\eta}(t)) dt \stackrel{\text{def}}{=} F(x, y)$$

Różniczkując w tym przypadku mogę wejść z operatorem pod znak całki,

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial x} &= \frac{1}{2\pi i} \int_a^b \frac{f(\gamma(t))}{(\gamma(t) - x - iy)^2} \dot{\gamma}(t) dt \\ \frac{\partial F}{\partial y} &= \frac{1}{2\pi i} \int_a^b \frac{f(\gamma(t))}{(\gamma(t) - x - iy)^2} (-1)(-i) \dot{\gamma}(t) dt \\ \frac{\partial f}{\partial z} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial F}{\partial x} - i \frac{\partial F}{\partial y} \right) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\gamma} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z)^2} d\zeta\end{aligned}$$

Ta pochodna jest różniczkowalna w sposób ciągły w sensie rzeczywistym, ponieważ istnieją wszystkie ciągłe pochodne cząstkowe. Chcemy sprawdzić, czy jest to różniczkowalne w sensie zespolonym. Sprowadza się to do policzenia pochodnej uzyskanego f' po $\partial/\partial\bar{z}$. Okazuje się, że

$$\frac{\partial^2 f}{\partial\bar{z}\partial z} = 0$$

zatem f' jest holomorficzną. Zabawę można kontynuować i otrzymać następujący wniosek.

Wniosek 8. Każda funkcja holomorficzną jest różniczkowalna w sensie zespolonym nieskończenie wiele razy. Wzór na n -tą pochodną wyraża się wzorem:

$$f^{(n)}(z) = \frac{n!}{2\pi i} \oint_{\gamma} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z)^{n+1}} d\zeta$$

Nierówności całkowe

Wniosek 9. $f \in \mathcal{A}(\Omega)$, $K(a, r) \subset \Omega$

$$f(a) = \frac{1}{\pi r^2} \int_{K(a, r)} f(x + iy) dx dy$$

Dowód.

$$\begin{aligned}\int_{K(a, r)} f(x + iy) dx dy &= \int_{\left\{ \begin{array}{l} z = a + \rho e^{i\phi} \\ x = \operatorname{Re}(a) + \rho \cos \phi \\ y = \operatorname{Im}(a) + \rho \sin \phi \end{array} \right\}} f(x + iy) dx dy \\ &= \int_0^r \rho d\rho \int_0^{2\pi} f(a + \rho e^{i\phi}) d\phi\end{aligned}$$

Teraz zauważamy, że drugą część całki iterowanej można policzyć z twierdzenia Cauchy'ego.

$$f(a) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\partial K(a, r)} \frac{f(\zeta)}{\zeta - a} d\zeta = \int_{\left\{ \begin{array}{l} \zeta = a + \rho e^{i\phi} \\ d\zeta = \rho i e^{i\phi} d\phi \end{array} \right\}} \frac{f(\zeta)}{\zeta - a} d\zeta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(a + \rho e^{i\phi}) d\phi$$

Podstawiając otrzymujemy:

$$\begin{aligned}\int_{K(a,r)} f(x+iy) dx dy &= \int_0^r \rho d\rho 2\pi f(a) \\ &= \pi f(a) r^2\end{aligned}$$

Nazywamy to (kolejnym) twierdzeniem o wartości średniej. ■

Wniosek 10 (Nierówność Cauchy'ego). $f \in \mathcal{A}(\Omega)$, $K(a, r) \subset \Omega$

$$\left| f^{(n)}(a) \right| \leq \frac{n!}{r^n} \sup_{z=a+re^{i\phi}} |f(z)|$$

Dowód. Zapisujemy wzór na n -tą pochodną funkcji holomorficzej dla obszaru będącym naszym kołem.

$$f^{(n)}(a) = \frac{n!}{2\pi i} \oint_{\partial K(a,r)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - a)^{n+1}} d\zeta$$

Parametryzujemy okrąg jak zwykle,

$$\begin{aligned}&= \frac{n!}{2\pi i} \int_0^{2\pi} \frac{f(a + re^{i\phi})}{r^{n+1} e^{i\phi(n+1)}} r e^{i\phi} d\phi \\ &= \frac{n!}{2\pi i r^n} \int_0^{2\pi} f(a + re^{i\phi}) e^{-ni\phi} d\phi\end{aligned}$$

Dostawiam moduły i kontynuuję rachunki.

$$\begin{aligned}\left| f^{(n)}(a) \right| &= \frac{n!}{2\pi r^n} \left| \int_0^{2\pi} f(a + re^{i\phi}) e^{-ni\phi} d\phi \right| \\ &\leq \frac{n!}{2\pi r^n} \int_0^{2\pi} |f(a + re^{i\phi})| d\phi \\ &\leq \frac{n!}{2\pi r^n} 2\pi \sup_{\partial K} |f(z)|\end{aligned}$$

■

Twierdzenie 9 (Twierdzenie Liouville'a). Funkcja holomorficzna na całym \mathbb{C} i ograniczona jest stała.

Dowód. Niech $M \in \mathbb{R}$ będzie ograniczeniem funkcji, czyli $|f(z)| < M$. Weźmy $\zeta \in \mathbb{C}$ i dowolne $r > 0$.

$$\left| f^{(n)}(\zeta) \right| \leq \frac{n!}{r^n} \sup_{z=\zeta+re^{i\phi}} |f(z)| \leq \frac{n!}{r^n} M$$

Ponadto $1/r^n$ jest dowolnie małe, zatem

$$\begin{aligned}0 &\leq \left| f^{(n)}(\zeta) \right| < \text{dowolna liczba} \\ &\quad \text{dodatnia} \\ f^{(n)}(\zeta) &= 0\end{aligned}$$

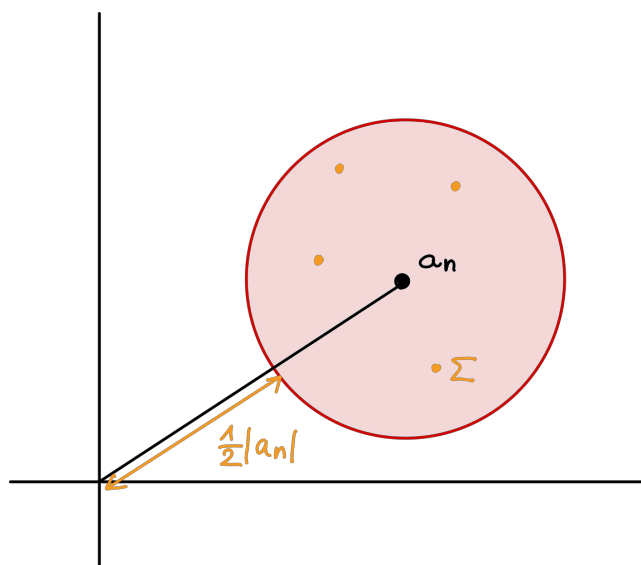
Skoro każda pochodna jest zerowa, to f musi być stała. ■

Twierdzenie 10 (Twierdzenie Gaussa). Każdy wielomian o współczynnikach zespolonych stopnia > 0 ma przynajmniej jeden pierwiastek.

Dowód. Niech $w(z) = a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0$. Załóżmy, że w nie ma pierwiastków w \mathbb{C} . W takim razie $f(z) = 1/w(z)$ jest holomorficzną na całym \mathbb{C} . Rozważmy również funkcję pomocniczą $w(z)/z^n = a_n + \dots + a_0/z^n$.

$$\left| \frac{w(z)}{z^n} \right| = \left| a_n + \frac{a_{n-1}}{z} + \dots + \frac{a_0}{z^n} \right| \stackrel{|z| > R}{>} \frac{1}{2} |a_n|$$

Ostatnia nierówność jest następstwem faktu, że dla dostatecznie dużych z (co do modułu), wszystkie wyrazy po a_n mogą być dowolnie małe. W szczególności więc $\exists R$, takie że od pewnego momentu, gdy $|z| > R$, nierówność zaczyna pracować.



Rysunek 2.2: Wizualizacja chodzi o to, że można dobrać takie R , dla którego szacowana funkcja będzie w takim obszarze.

Szacujemy dalej, pamiętając iż $|z| > R$.

$$\begin{aligned} |w(z)| &> \frac{1}{2} |a_n| |z^n| \\ |f(z)| &< \frac{2}{|a_n| |z^n|} < \frac{2}{|a_n| R^n} \end{aligned}$$

Pokazaliśmy więc, że dla $|z| > R$, $f(z)$ jest ograniczona. Ponadto $f(z)$ musi być również ograniczona w kole $|z| < R$, gdyż funkcja ciągła na obszarze zwartym jest ograniczona. Ponadto, funkcja $f(z)$ jest z założenia holomorficzną, zatem z twierdzenia Liouville'a musi być stała. Stąd wniosek, że również $w(z)$ musi być stała, co jest sprzeczne z założeniem $\deg w(z) \geq 1$. To kończy dowód. ■

Bezpośrednim następstwem tego twierdzenia jest zasadnicze twierdzenie algebry! Mając pierwiastek stopnia n , wiemy że ma on pierwiastek zespolony, po czym dzielimy ten wielomian przez $(z - z_0)$ otrzymując wielomian o stopień mniejszy. I tak dalej aż otrzymamy n pierwiastków.

Wykład 8: Szeregi

09 lis 2020

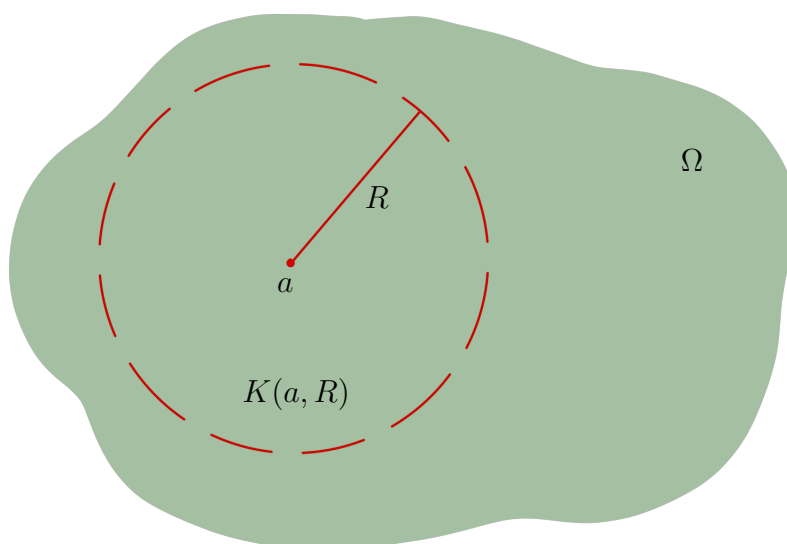
Rozwinięcie funkcji holomorficznej w szereg Taylora

Okazuje się, że dla funkcji holomorficznych nie zdarza się tak jak czasem w \mathbb{R} , że rozwinięcie w szereg nie jest zbieżne do tej samej funkcji. Mówi o tym poniższe twierdzenie.

Twierdzenie 11. Niech $f \in \mathcal{A}(\Omega)$, $a \in \Omega$, $K(a, R) \subset \Omega$, gdzie $R > 0$ jest dowolne, byle się zmieścić w obszarze holomorficzności. Wówczas, szereg

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (z - a)^n$$

jest zbieżny niemal jednostajnie w $K(a, R)$ do funkcji f .



Rysunek 2.3: Obszar rozwinięcia w szereg Taylora.

Dowód. Aby wykazać zbieżność niemal jednostajną wystarczy pokazać, że jest to zbieżność jednostajna na każdym takim kole K o promieniu $r < R$. Zapiszmy nierówność Cauchy'ego:

$$\left| f^{(n)}(a) \right| \leq \frac{n!}{R^n} \sup_{z=a+Re^{i\phi}} |f(z)|$$

Dowodzimy jednostajnej zbieżności na $\overline{K(a, r)}$ dla $r < R$. Skorzystamy z kryterium jednostajnej zbieżności Weierstrassa: jeśli dla pewnego $a_n > 0$, $\sum a_n$ jest zbieżny oraz

$\forall_n |u_n(z)| < a_n$, to $\sum u_n(z)$ jest jednostajnie zbieżny.

$$|c_n| = \left| \frac{f^{(n)}(a)}{n!} \right| = \frac{|f^{(n)}(a)|}{n!} \leq \frac{n!}{n!R^n} \sup_{\partial K} |f(z)| = \frac{C}{R^n}$$

Dla $z \in \overline{K(a, r)}$,

$$|c_n(z - a)^n| \leq \frac{C}{R^n} r^n = C \left(\frac{r}{R} \right)^n$$

Dostaliśmy oszacowanie przez wyraz szeregu geometrycznego z $|q| < 1$, czyli zbieżnego. Na mocy kryterium Weierstrassa i wobec dowolności r , rozważany szereg jest niemal jednostajnie zbieżny na $K(a, R)$. Teraz trzeba rozważyć zbieżność do samej f . Niech $r' < r$,

$$\begin{aligned} f(z) &= \frac{1}{2\pi i} \oint_{\partial K(a, r')} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\partial K(a, r')} \frac{f(\zeta)}{\zeta - a} \frac{\zeta - a}{\zeta - z} d\zeta \\ &= \frac{1}{2\pi i} \oint_{\partial K(a, r')} \frac{f(\zeta)}{\zeta - a} \frac{1}{1 - \frac{z-a}{\zeta-a}} d\zeta \\ &= \frac{1}{2\pi i} \oint_{\partial K(a, r')} \frac{f(\zeta)}{\zeta - a} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z-a}{\zeta-a} \right)^n d\zeta \end{aligned}$$

Całkę z sumą można zamienić bo mamy do czynienia z szeregiem jednostajnie zbieżnym, a rachunki prowadzimy w obszarze tej zbieżności.

$$= \frac{1}{2\pi i} \sum_{n=0}^{\infty} (z-a)^n \oint_{\partial K(a, r')} \frac{f(\zeta)}{(\zeta-a)^{n+1}} d\zeta$$

Rozpoznajemy w tym wzór na n -tą pochodną funkcji holomorficzej!

$$= \sum_{n=0}^{\infty} (z-a)^n \frac{f^{(n)}(a)}{n!}$$

Z r i r' możemy się dowolnie zbliżyć do R , zatem w całym $K(a, R)$ szereg jest zbieżny do funkcji $f(z)$. ■

Wniosek 11. Każda funkcja holomorficzna jest również funkcją analityczną, czyli zadaną przez zbieżny szereg.

Twierdzenie 12 (Obszar zbieżności rozwinięcia). Niech $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ będzie ciągiem w \mathbb{C} . $1/R = \limsup \sqrt[n]{|a_n|}$. Funkcja $f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n$ jest funkcją holomorficzną w $K(z_0, R)$. Ponadto, $a_n = \frac{f^{(n)}(z_0)}{n!}$.

Dowód. Dowód analogiczny do tego na Analizie II. ■

Ważne funkcje holomorficzne

Funkcje trygonometryczne Oczywiście wszystkie przekształcenia i własności algebraiczne funkcji są takie same, bo to czysta algebra i nie ma znaczenia czy z jest rzeczywiste, czy zespolone. Natomiast,

$$e^z = \exp(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$$

$$\sin z = \frac{1}{2i}(e^{iz} - e^{-iz})$$

$$\cos z = \frac{1}{2}(e^{iz} + e^{-iz})$$

$$\sinh z = \frac{1}{2}(e^z - e^{-z})$$

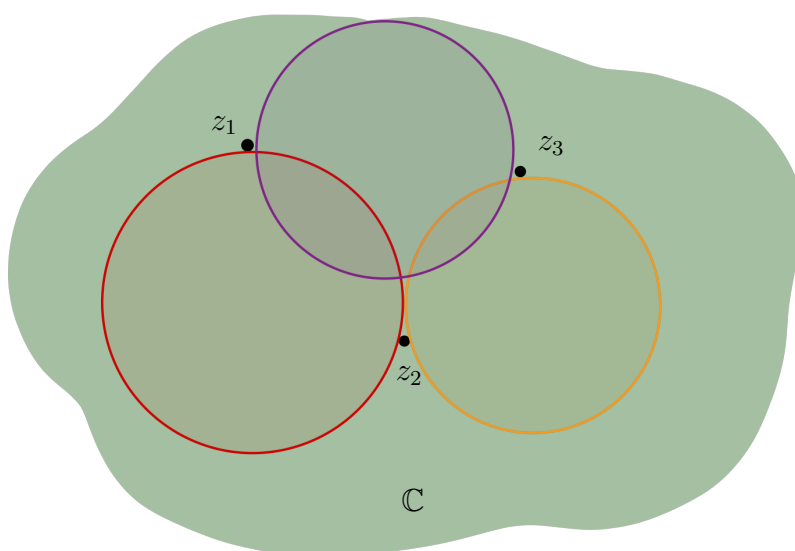
$$\cosh z = \frac{1}{2}(e^z + e^{-z})$$

Ponadto, w dziedzinie zespolonej funkcje trygonometryczne już niekoniecznie są periodyczne.

Funkcje wymierne

$$f(z) = \frac{P(z)}{Q(z)} \in \mathcal{A}(\mathbb{C} \setminus \{z_1, \dots, z_n\})$$

gdzie $\{z_i\}$ to zbiór pierwiastków wielomianu $Q(z)$. Aby dostać rozwinięcie takich funkcji, rozkładamy je na ułamki proste i rozwijamy w każdym kole, które omija osobliwości.



Rysunek 2.4: Przykładowe rozwinięcia funkcji wymiernej z ominięciem osobliwości.

$$\mathcal{A}(\mathbb{C} \setminus \{1\}) \ni \frac{1}{1-z} = \sum_{n=0}^{\infty} z^n$$

przy czym należy pamiętać, że ostatni szereg w tej postaci jest zbieżny w $K(0, 1)$. Spróbujmy rozwinąć tę funkcję w punkcie $2 - i$.

$$\begin{aligned}\frac{1}{1-z} &= \frac{1}{1-z+(2-i)-(2-i)} = \frac{1}{1-(2-i)-(z-2+i)} \\ &= \frac{1}{i-1} \frac{1}{1-\frac{z-(2-i)}{i-1}} = \frac{1}{i-1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(z-(2-i))^n}{(i-1)^n}\end{aligned}$$

Wniosek 12. Wnioski z Twierdzenia Liouville’a:

1. Jeśli $f \in \mathcal{A}(\Omega)$ (Ω spójny) taka, że $\forall_n f^{(n)}(a) = 0$ to f jest stała na Ω .
2. Jeśli dwie funkcje holomorficzne mają równe wszystkie pochodne w pewnym punkcie na Ω , to różnią się o stałą.
3. Miejsca zerowe funkcji holomorficznej są izolowane – każde dwa miejsca zerowe mają rozłączne otoczenia.

Dowód (3). Pierwsze dwa punkty są trywialne. Trzeci dowodzimy ad absurdum. Załóżmy, że istnieje punkt skupienia a miejsc zerowych. Stąd istnieje ciąg $a = \lim a_n$, gdzie $f(a_n) = 0$.

$$f(a) = f(\lim_{n \rightarrow \infty} a_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) = 0$$

Wówczas sam punkt skupienia jest miejscem zerowym, tj. $f(a) = 0$.

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (z-a)^n$$

Przyjmijmy, że $k: f^{(k)}(a) \neq 0$, wcześniejsze są równe zero.

$$\begin{aligned}&= (z-a)^k \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(k+n)}(a)}{(k+n)!} (z-a)^n = (z-a)^k g(z) \\ g(a_n) &= \frac{f(a_n)}{(a_n-a)^k} = 0 \\ \lim_{n \rightarrow \infty} g(a_n) &= g(a) = 0\end{aligned}$$

Doszliliśmy do sprzeczności, bo zakładaliśmy, że od k wzwyż pochodne f się nie zerują. ■

Logarytm Definicja logarytmu rzeczywistego wyglądała tak:

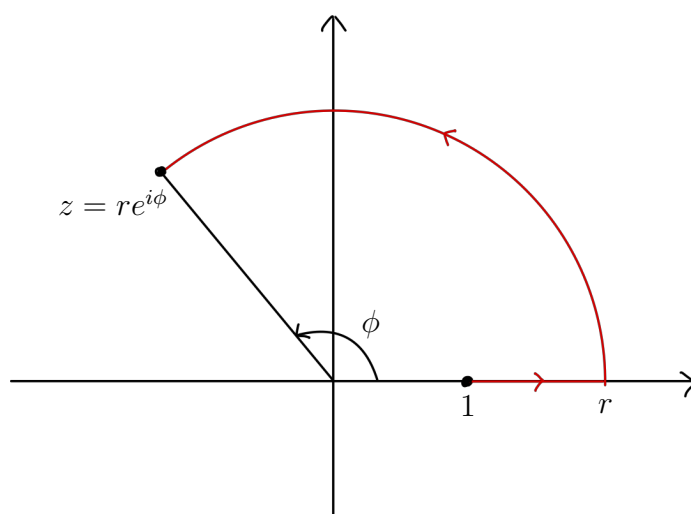
$$\log(x) = \int_1^x \frac{1}{t} dt$$

Moglibyśmy spróbować czegoś podobnego dla dziedziny zespolonej.

$$\log(z) = \int_1^z \frac{1}{\zeta} d\zeta$$

Całki na \mathbb{C} są na ogół po krzywej. Taka postać pojawiła się dotąd tylko raz, gdy całka nie zależała od krzywej całkowania. Tak było, gdy funkcja podcałkowa była holomorficzna. Nasza funkcja taka jest wszędzie poza 0. Stwarza to problemy z obieganiem punktu osobliwego przy całkowaniu. Można wybrać standardową drogę, ale wciąż obiegając po pełnym okręgu, całka mi się nie wyzeruje tylko dostanę $2\pi i$. Innymi słowy, argument nie jest jednoznacznie wyznaczony w poniższym wyrażeniu.

$$\begin{aligned}\log(z) &= \int_1^r \frac{1}{x} dx + \int_0^\phi \frac{1}{re^{i\phi}} ire^{i\phi} d\phi \\ &= \log|z| + i \arg(z)\end{aligned}$$



Rysunek 2.5: Klasyczna droga całkowania dla logarytmu.

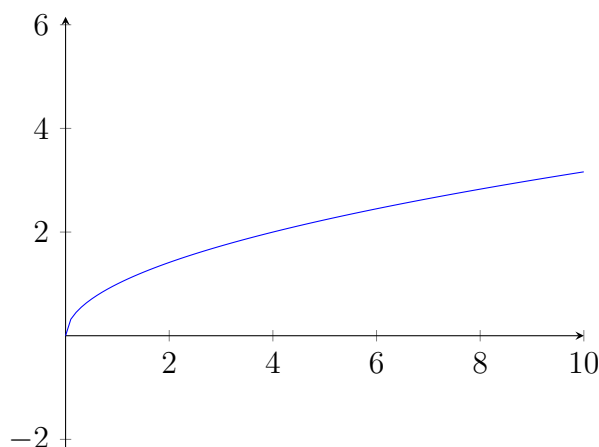
Można wybrnąć z tego mówiąc, że logarytm definiujemy tylko jako funkcję holomorficzną na $\mathbb{C} \setminus (-\infty, 0]$. Taki logarytm nazywa się gałęzią główną logarytmu i określa przez $\text{Log}(z)$.

Innym sposobem radzenia sobie z tym problemem jest rozważanie Powierzchni Riemanna.

Wykład 9

13 lis 2020

Pierwiastek Najpierw przypomnijmy jak to wyglądało w \mathbb{R} .

Rysunek 2.6: $x \in \mathbb{R}_+ : x \mapsto \sqrt{x}$

Rozwijamy w szereg w $x_0 = 1$.

$$\begin{aligned}\sqrt{x} &= \sqrt{1 + (x - 1)} = \sqrt{1 + t} = (1 + t)^{1/2} \\ &= 1 + \frac{1}{2}t + \frac{1}{2!}\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2} - 1\right)t^2 + \cdots + \frac{1}{k!}\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2} - 1\right) \cdots \left(\frac{1}{2} - (k - 1)\right)t^k \\ &= 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \binom{1/2}{k} t^k = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \binom{1/2}{k} (x - 1)^k\end{aligned}$$

To ma promień zbieżności $R = 1$ i to nam definiuje pierwiastek dla $x \in (0, 2]$ (dla $x = 0$ szereg jest niezbieżny).

Teraz uogólniamy na dziedzinę zespoloną.

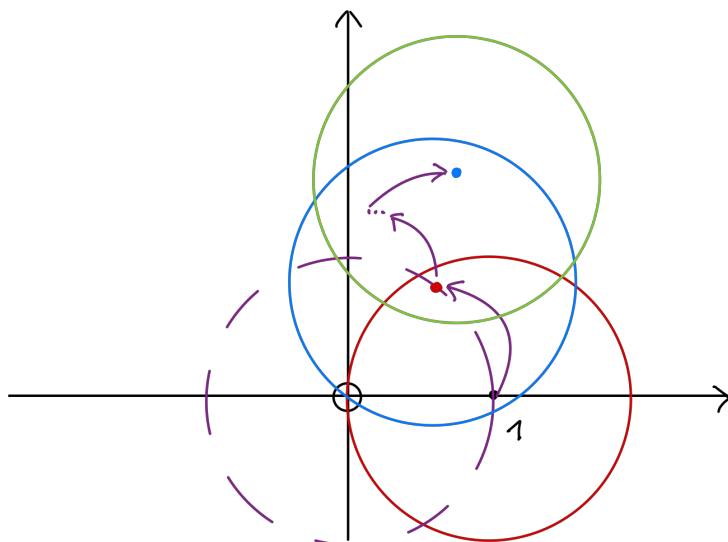
$$f(z) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \binom{1/2}{k} (z - 1)^k$$

Taka mała dziedzina $z \in K(1, 1)$ to jednak trochę dla nas za mało. Można postąpić **metodą przedłużania analitycznego**. Wybieramy w kole zbieżności jakiś punkt. Teraz rozwijamy funkcję w szereg, wokół tego punktu. Możemy to zrobić bo funkcję holomorficzną można rozwinąć w każdym punkcie, na którym jest holomorficzna. Dostajemy wobec tego większy obszar zbieżności.

Jak tak będziemy rozwijać kolejno na kolejnych punktach okręgu jednostkowego, to po zatoczeniu koła nie wrócimy do tej samej funkcji, tylko dostaniemy ten drugi pierwiastek. Funkcja przestaje być wtedy jednoznaczna.

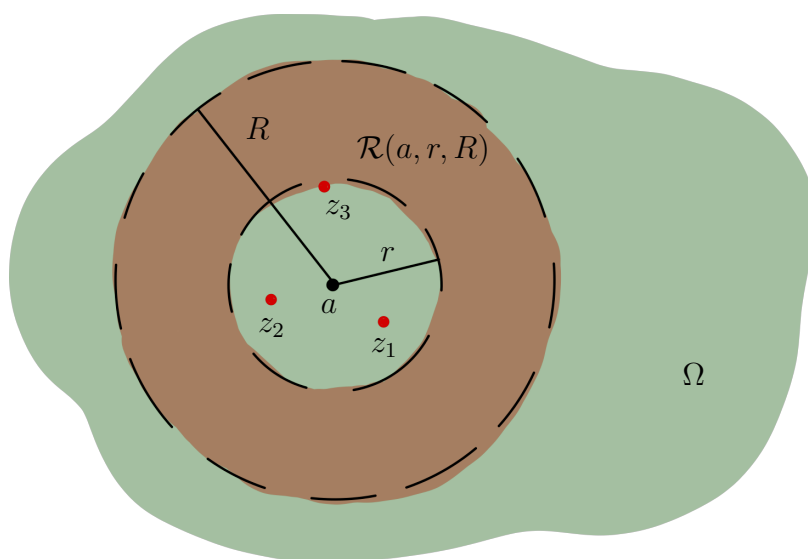
$$\begin{aligned}x^{1/2} &= \exp\left(\frac{1}{2} \log x\right) \\ \exp\left(\frac{1}{2} \log z\right) &= \exp\left(\frac{1}{2} \log r + \frac{1}{2} i\phi\right) = \sqrt{r} e^{1/2 i\phi}\end{aligned}$$

W takiej reprezentacji dobrze widać tę niejednoznaczność (bo argument, będący logarytmem jest niejednoznaczny).



Rysunek 2.7: Idea przedłużenia analitycznego pierwiastka.

Rozwinięcie funkcji holomorficznej w szereg Laurenta



Rysunek 2.8: Pierścień otwarty $\mathcal{R}(a, r, R)$, który nie zawiera osobliwości $\{z_1, z_2, z_3\}$.

Twierdzenie 13 (Laurent). Pierścień otwarty $\mathcal{R}(a, r, R) = \{z \in \mathbb{C} : r < |z - a| < R\}$. Niech $f \in \mathcal{A}(\Omega)$, gdzie $\mathcal{R}(a, r, R) \subset \Omega$. Wybieramy $z \in \mathcal{R}(a, r, R)$. Wówczas, f rozwija się w szereg:

$$f(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n (z - a)^n = \cdots + \frac{a_{-1}}{(z - a)} + a_0 + a_1(z - a) + \cdots$$

Szereg jest zbieżny bezwzględnie i niemal jednostajnie. Ponadto,

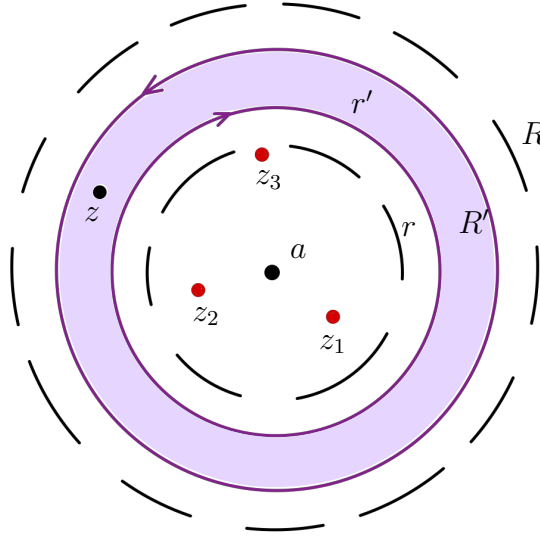
$$a_n = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\partial K(a, \rho)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - a)^{n+1}} d\zeta$$

gdzie $r < \rho < R$ (mieści się w pierścieniu).

W szczególności, weźmy $n = -1$. Wówczas,

$$a_{-1} = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\partial K(a, \rho)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - a)^{-1+1}} d\zeta = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\partial K(a, \rho)} f(\zeta) d\zeta$$

Jeden wyraz szeregu daje nam extra całkę. To jest kwintesencja całkowania przez residua, do czego dojdziemy. Można uzyskać całkę poprzez znajomość rozwinięcia w szereg.



Rysunek 2.9: Dowód twierdzenia Laurent.

Dowód. Wybieramy dodatkowo dwa promienie $r < r' < R' < R$. Wówczas $\mathcal{R}(a, r', R') \subset \Omega$. Ponadto, $r' < |z - a| < R'$. Ze wzoru Cauchy'ego,

$$\begin{aligned} 2\pi i f(z) &= \int_{\partial \mathcal{R}(a, r', R')} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z)} d\zeta \\ &= \oint_{C_{R'}} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta - \oint_{C_{r'}} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta \end{aligned}$$

Pierwszą całkę liczymy jak w dowodzie twierdzenia Taylora, drugą trochę inaczej.

$$\begin{aligned}\oint_{C_{R'}} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta &= \oint_{C_{R'}} \frac{f(\zeta)}{\zeta - a} \frac{\zeta - a}{(\zeta - a) + a - z} d\zeta \\ &= \oint_{C_{R'}} \frac{f(\zeta)}{\zeta - a} \frac{1}{1 - \frac{z-a}{\zeta-a}} d\zeta\end{aligned}$$

Moduł tego ułamka w mianowniku jest < 1 ,

$$\begin{aligned}&= \oint_{C_{R'}} \left[\frac{f(\zeta)}{\zeta - a} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z-a}{\zeta-a} \right)^n \right] d\zeta \\ &= \oint_{C_{R'}} \sum_{n=0}^{\infty} f(\zeta) \frac{(z-a)^n}{(\zeta-a)^{n+1}} d\zeta = (*)\end{aligned}$$

Weźmy jeszcze $r < r' < r'' \leq |z-a| \leq R'' < R' < R$. Chcemy pokazać jednostajną zbieżność.

$$\begin{aligned}\left| f(\zeta) \frac{(z-a)^n}{(\zeta-a)^{n+1}} \right| &= |f(\zeta)| \frac{|z-a|^n}{|\zeta-a|^{n+1}} \\ &\leq \frac{|f(\zeta)|(R'')^n}{(R')^{n+1}} \leq \frac{M}{R'} \left(\frac{R''}{R'} \right)^n\end{aligned}$$

Jest to wyraz szeregu liczbowego zbieżnego. Na podstawie kryterium Weierstrassa, nasz szereg jest zbieżny jednostajnie. Możemy więc zamienić kolejność sumowania i całkowania.

$$(*) = \sum_{n=0}^{\infty} (z-a)^n \oint_{C_{R'}} \frac{f(\zeta)}{(\zeta-a)^{n+1}} d\zeta$$

Teraz liczymy drugą całkę.

$$\begin{aligned}\oint_{C_{r'}} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta &= \oint_{C_{r'}} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - a) + (a - z)} d\zeta = \oint_{C_{r'}} \frac{f(\zeta)}{(z-a) \left[\frac{\zeta-a}{z-a} - 1 \right]} d\zeta \\ &= \oint_{C_{r'}} \frac{-f(\zeta)}{(z-a)} \frac{1}{1 - \frac{\zeta-a}{z-a}} d\zeta\end{aligned}$$

Po zapisaniu jako szereg,

$$\begin{aligned}&= \oint_{C_{r'}} \frac{-f(\zeta)}{z-a} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\zeta-a}{z-a} \right)^n d\zeta \\ &= \oint_{C_{r'}} \sum_{n=0}^{\infty} (-f(\zeta)) \frac{(\zeta-a)^n}{(z-a)^{n+1}} d\zeta = (**)\end{aligned}$$

Pytanie, czy znów można zamienić kolejność,

$$\left| f(\zeta) \frac{(\zeta-a)^n}{(z-a)^{n+1}} \right| \leq M \frac{(r')^n}{(r'')^{n+1}} = \frac{M}{(r'')} \left(\frac{r'}{r''} \right)^n$$

Znów oszacowaliśmy przez zbieżny szereg liczbowy, zatem można zamienić kolejność sumowania i całkowania:

$$(**) = - \sum_{k=-\infty}^{-1} (z-a)^k \oint_{C_{r'}} \frac{f(\zeta)}{(\zeta-a)^{k+1}} d\zeta$$

Teraz wszystko można poskładać. Ostatecznie $C_{R'}$ i $C_{r'}$ zastępujemy C_ρ dla $r < \rho < R$. Pokazaliśmy niemal jednostajną zbieżność na zwartym pierścieniu $\overline{\mathcal{R}}(a, r'', R'')$. ■

Przykład Weźmy funkcję wymierną,

$$f(z) = \frac{2zi}{(1-z)(z+i)^2} = \frac{A}{1-z} + \frac{B}{z+i} + \frac{C}{(z+i)^2}$$

Będziemy rozwijać w $\mathcal{R}(-i, 0, \sqrt{2})$, tj. na takim obszarze, którego brzeg zawiera osobliwości (ale wewnątrz oczywiście nie, co wystarczy).

$$f(z) = \frac{1}{1-z} + \frac{1/2(1-i)}{z+i} + \frac{1/2(1-i)}{(z+i)^2}$$

Druga część jest już gotowa do rozwinięcia w $-i$. Wówczas widzimy też, że $a_n = 0$ dla $n < -2$.

$$\begin{aligned} \frac{1}{1-z} &= \frac{1}{1+i-i-z} = \frac{1}{(1+i)-(i+z)} = \frac{1}{1+i} \frac{1}{1-\frac{i+z}{1+i}} \\ &= \frac{1}{1+i} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{1+i} \right)^n (i+z)^n \end{aligned}$$

To rozwinięcie działa, gdyż $|i+z| < \sqrt{2}$ oraz $|1+i| = \sqrt{2}$, zatem $|i+z|/|1+i| < 1$.

Przykład' Teraz chcielibyśmy rozwinąć to samo w $\mathcal{R}(0, 1, \infty)$. Każdy z tych ułamków prostych rozwijamy osobno.

$$\frac{1}{1-z} = \frac{1}{z\left(\frac{1}{z}-1\right)} = -\frac{1}{z} \frac{1}{1-\frac{1}{z}}$$

$|z| > 1$, zatem $|1/z| < 1$.

$$\begin{aligned} &= -\frac{1}{z} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{z} \right)^n = -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{z^{n+1}} \\ &= -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{z^n} = -\sum_{n=-\infty}^{-1} z^n \end{aligned}$$

Teraz drugi składnik,

$$\begin{aligned} \frac{1}{z+i} &= \frac{1}{z} \frac{1}{1+\frac{i}{z}} = \frac{1}{z} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(i)^n}{z^n} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-i)^{n-1}}{z^n} = \sum_{n=-\infty}^{-1} (-i)^{-n-1} z^n \end{aligned}$$

Ostatni składnik,

$$\begin{aligned}\frac{1}{(z+i)^2} &= \frac{d}{dz} \left(\frac{-1}{z+i} \right) = -\frac{d}{dz} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-i)^n}{z^{n+1}} \right) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-i)^n (n+1)}{z^{n+2}} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-i)^{n-2} (n-1)}{z^n} \\ &= - \sum_{n=-\infty}^{-2} (-i)^{-n-2} (n+1) z^n\end{aligned}$$

Teraz, na końcu trzeba wziąć te 3 części dodać pamiętając, że były jeszcze współczynniki A, B, C .

Wykład 10: Całkowanie przez Residua

16 lis 2020

Twierdzenie 14 (Bez dowodu). Jeśli $f(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k (z-a)^k$ w $\mathcal{R}(a, r, R)$ to f jest holomorficzna w $\mathcal{R}(a, r, R)$ oraz

$$b_k = \frac{1}{2\pi i} \oint_{C_\rho} \frac{f(\zeta)}{(\zeta-a)^{k+1}} d\zeta, \quad r < \rho < R$$

Oznacza to, że rozwinięcie w szereg Laurent jest zawsze jednoznaczne. Dany szereg odpowiada danej funkcji.

Klasyfikacja osobliwości

Jeśli funkcja f jest holomorficzna w pierścieniu $\mathcal{R}(a, 0, R)$, czyli osobliwość $z = a$ jest izolowana, to:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n (z-a)^n = \underbrace{\sum_{n=-\infty}^{-1} b_n (z-a)^n}_{\text{część główna rozwinięcia}} + \sum_{n=0}^{\infty} b_n (z-a)^n$$

Przyjmując założenie o $z = a$, będącym osobliwością izolowaną, definiujemy...

Definicja 12 (Osobliwość usuwalna). Jeśli $b_n = 0$ dla $n < 0$, czyli część główna rozwinięcia zanika, to $f(a) = b_0$ nazywamy osobliwością usuwalną. Wówczas $f \in \mathcal{A}(K(a, R))$.

Przykładowo, $f(z) = \sin z/z$ ma osobliwość usuwalną w $z = 0$, gdyż $\lim_{z \rightarrow 0} \sin z/z = 1$.

Definicja 13 (Biegun rzędu n). Jeśli $\exists n \in \mathbb{N} : \forall k < -n \quad b_k = 0$ oraz $b_{-n} \neq 0$, tj.

$$f(z) = \frac{b_{-n}}{(z-a)^n} + \frac{b_{-n+1}}{(z-a)^{n-1}} + \dots + b_0 + b_1(z-a) + \dots$$

to osobliwość w $z = a$ nazywamy biegunem rzędu n . Biegun rzędu 1 nazywamy biegunem prostym.

Tutaj wyłania się nawet cała klasa przykładów. Zauważmy, że funkcje wymierne postaci $f(z) = P(z)/Q(z)$ mają bieguny w pierwiastkach wielomianu $Q(z)$. W szczególności, dla $Q(z) = (z - z_1)(z - z_2)^2 w(z)$, z_1 jest biegunem rzędu 1, z_2 jest biegunem rzędu 2.

Innym przykładem jest $f(z) = (1 - e^z)/z^2$, gdzie dla $z = 0$ jest biegun prosty (rzędu 1), bo jak się rozwinie e^z w szereg to się skracają potęgi w mianowniku i zostaje $1/z + 1/2 + \dots$.

Definicja 14 (Punkt istotnie osobliwy). Jeśli część główna rozwinięcia zawiera nieskończenie wiele wyrazów $\neq 0$, to osobliwość w $z = a$ jest nazywana punktem istotnie osobliwym.

Przykład:

$$\exp\left(\frac{1}{z}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{z}\right)^n \frac{1}{n!} = \dots + \frac{1}{3!} \frac{1}{z^3} + \frac{1}{2!} \frac{1}{z^2} + \frac{1}{z} + 1$$

Funkcja ta ma punkt istotnie osobliwy $z = 0$.

A co z osobliwościami nieizolowanymi? Przykładowo w $z = 0$, $f(z) = 1/\sin(1/z)$ ma osobliwość nieizolowaną, co możemy pokazać następująco. $f(z)$ ma jeszcze osobliwości w $z_k = \frac{1}{k\pi}$ – te są izolowanymi biegunami prostymi. Ponadto,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} z_k = 0$$

Wobec tego mamy ciąg osobliwości zbieżny do osobliwości $z = 0 \implies$ jest ona osobliwością nieizolowaną. W takim wypadku nasze definicje nic nie rozstrzygają.

Definicja 15 (Residuum). Niech z_0 będzie izolowanym punktem osobliwym funkcji f . Współczynnik b_{-1} w rozwinięciu w szereg Laurent nazywamy residuum oraz piszemy $b_{-1} = \text{Res}_{z_0} f$.

$$b_{-1} = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\partial K(z_0, \rho)} f(z) dz$$

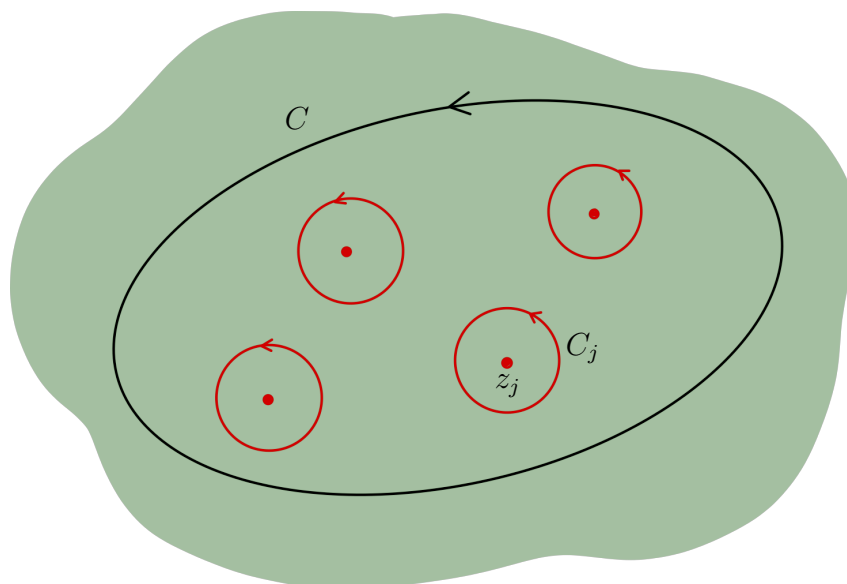
$$\oint f(z) dz = 2\pi i \text{Res}_{z_0} f$$

Jest to po prostu całka wokół punktu izolowanego.

Jak to się może przydać? Rozważmy, że chcemy całkować po dużym konturze, wewnątrz którego mamy więcej punktów izolowanych niż 1.

Wniosek 13 (Całkowanie przez residua).

$$\oint_C f(z) dz = \sum_{j=1}^n \oint_{C_j} f(z) dz = 2\pi i \sum_{j=1}^n \operatorname{Res}_{z_j} f$$



Rysunek 2.10: Całkowanie przez residua.

Dowód. Rozważmy całkę po $C \cup (\bigcup C_j)$, gdzie C jest zorientowane przeciwwzegarowo, a C_j zegarowo. Wówczas wnętrze tego konturu jest obszarem holomorficznosci $f(z)$, zatem na podstawie twierdzenia Stokesa, całka po takim konturze się zeruje. Stąd,

$$0 = \oint_C f(z) dz + \sum_{j=1}^n \oint_{C_j} f(z) dz$$

$$\oint_C f(z) dz = - \sum_{j=1}^n \oint_{C_j} f(z) dz = 2\pi i \sum_{j=1}^n \operatorname{Res}_{z_j} f$$

■

Całki z funkcji trygonometrycznych (po okresie)

Policzmy taką całkę $F = \int_0^{2\pi} \frac{dt}{a + b \cos t}$, $a > b$.

Wprowadźmy podstawienie, które nas przeniesie do dziedziny zespolonej.

$$\cos t = \frac{1}{2} (e^{it} + e^{-it}) = \frac{1}{2} \left(z + \frac{1}{z} \right)$$

gdzie $z = e^{it} \in C(0, 1)$.

$$\begin{aligned} F &= \oint_{C(0,1)} \frac{dz / iz}{a + \frac{b}{2}\left(z + \frac{1}{z}\right)} = \frac{1}{i} \oint_{C(0,1)} \frac{dz}{az + \frac{b}{2}z^2 + \frac{b}{2}} \\ &= \frac{1}{i} \oint \frac{2 dz}{bz^2 + 2az + b} = (*) \end{aligned}$$

Teraz interesują nas osobliwości tej funkcji wymiernej.

$$\begin{aligned} b\left(z^2 + 2\frac{a}{b}z + 1\right) &= b\left(\left(z + \frac{a}{b}\right)^2 - \frac{a^2}{b^2} + 1\right) \\ &= b\left(z + \frac{a}{b} + \sqrt{\frac{a^2}{b^2} - 1}\right)\left(z + \frac{a}{b} - \sqrt{\frac{a^2}{b^2} - 1}\right) \\ z_0 &= \sqrt{\frac{a^2}{b^2} - 1} - \frac{a}{b} \in K(0, 1) \end{aligned}$$

Drugi pierwiastek nie jest nam potrzebny, bo jest poza obszarem całkowania.

$$(*) = 2\pi i \operatorname{Res}_{z_0}(f) \frac{1}{i}$$

Teraz myślimy jak policzyć residuum. W z_0 jest biegun prosty, zatem jak chcemy rozwinąć w szereg, to mamy

$$f(z) = \frac{2}{b(z - z_1)(z - z_0)} = \frac{\operatorname{Res}_{z_0}}{(z - z_0)} + \dots$$

Stąd,

$$\begin{aligned} \operatorname{Res}_{z_0} &= \lim_{z \rightarrow z_0} (z - z_0)f(z) = \frac{2}{b(z_0 - z_1)} = \frac{2}{b\left(\sqrt{\Delta} - \frac{a}{b} + \frac{a}{b} + \sqrt{\Delta}\right)} \\ &= \frac{1}{b\sqrt{\frac{a^2}{b^2} - 1}} \end{aligned}$$

Stąd,

$$(*) = F = \frac{2\pi}{\sqrt{a^2 - b^2}}$$

Całki z funkcji wymiernych

Policzymy całkę $F = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x^2}{x^4 + 1} dx$.

Mianownik ma oczywiście pierwiastki zespolone, ale na osi rzeczywistej nie ma ani jednego. Technika liczenia takiej całki polega na rozszerzeniu funkcji podcałkowej na płaszczyznę zespoloną, tj.

$$f(z) = \frac{z^2}{z^4 + 1}$$

Całkować ją będziemy po brzegu półkola górnego (bo chcemy trafić z konturem na oś rzeczywistą. Najpierw promień R bierzemy skończony, następnie przechodzimy do granicy.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x^2}{x^4 + 1} dx = \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{\Gamma_1} f(z) dz$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \oint_{\Gamma} f(z) dz = F + \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{\Gamma_2} f(z) dz$$

Liczymy całkę po Γ_2 ,

$$\int_{\Gamma_2} \frac{z^2 dz}{z^4 + 1} = \int_0^\pi \frac{R^2 e^{2i\phi} R i e^{i\phi}}{R^4 e^{4i\phi} + 1} d\phi = \frac{1}{R} \int_0^\pi \frac{i e^{3i\phi}}{e^{4i\phi} + 1/R^4} d\phi$$

$$\left| \int_{\Gamma_2} f(z) dz \right| \leq \frac{1}{R} \int_0^\pi \frac{d\phi}{|e^{4i\phi} + 1/R^4|} \leq \frac{1}{R} \frac{\pi}{1 - 1/R^4} \xrightarrow{R \rightarrow \infty} 0$$

W związku z tym,

$$F = \lim_{R \rightarrow \infty} \oint_{\Gamma} \frac{z^2 dz}{z^4 + 1} = 2\pi i (\text{Res}_{e^{i\pi/4}} f + \text{Res}_{e^{3i\pi/4}} f)$$

Teraz badamy residua,

$$\frac{z^2}{z^4 + 1} = z^2 \frac{1}{(z - z_1)(z - z_2)(z - z_3)(z - z_4)}$$

gdzie $(z_1, z_2, z_3, z_4) = (e^{i\pi/4}, e^{3i\pi/4}, e^{5i\pi/4}, e^{7i\pi/4})$. Są to bieguny proste, zatem

$$\text{Res}_{z_i} f = \lim_{z \rightarrow z_i} (z - z_i) f(z)$$

$$\text{Res}_{z_1} f = \frac{z_1^2}{(z_1 - z_2)(z_1 - z_3)(z_1 - z_4)}$$

$$= \frac{z_1^2}{e^{i\pi/2} (e^{i\pi/4} - e^{3i\pi/4})(e^{i\pi/4} - e^{5i\pi/4})(e^{i\pi/4} - e^{7i\pi/4})}$$

$$= e^{i\pi/2} \frac{1}{e^{i\pi/2} (e^{-i\pi/4} - e^{i\pi/4}) e^{3i\pi/4} (e^{-i\pi/2} - e^{i\pi/2}) e^{i\pi} (e^{-3i\pi/4} - e^{3i\pi/4})}$$

$$= \frac{1}{(-2i)^3} \frac{1}{\frac{1}{2}(-1)e^{3i\pi/4}} = \frac{i}{4} e^{-3i\pi/4}$$

Analogicznie dla drugiej osobliwości z_2 .

$$\text{Res}_{z_2} f = \frac{i}{4} e^{3i\pi/4}$$

$$\text{Res}_{z_1} f + \text{Res}_{z_2} f = \frac{i}{4} (e^{-3i\pi/4} + e^{3i\pi/4})$$

$$= \frac{i}{2} \cos\left(\frac{3\pi}{4}\right) = -i \frac{\sqrt{2}}{4}$$

$$F = -2\pi i \cdot \frac{i\sqrt{2}}{4} = \frac{\pi\sqrt{2}}{2}$$

Wykład 11

20 lis 2020

Całki z funkcji postaci $Q(x) \exp(iax)$

Tego typu całki liczy się w transformacie Fouriera, są przydatne w mechanice kwantowej, teorii pola itd.

Kiedy $a > 0$, tj. $f(x) = Q(x)e^{iax}$ to całkujemy po dodatnim półokręgu, a jak $a < 0$ to po dolnym półokręgu. Pokażemy, że w obu przypadkach całka po łuku zanika w nieskończoności.

Lemat 1 (Lemat Jordana). Niech f będzie funkcją ciągłą określoną w górnej (dolnej) półpłaszczyźnie. Jeśli $\lim_{z \rightarrow \infty} f(z) = 0$, to

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} e^{iaz} f(z) dz = 0$$

gdzie C_R jest górnym półokręgiem dla $a > 0$ i dolnym dla $a < 0$.

Dowód. Potrzebne oszacowanie: $\sin \phi \geq \frac{2}{\pi} \phi$ dla $\phi \in [0, \pi/2]$.

Niech $a > 0$, czyli C_R jest górnym półokręgiem.

$$\int_{C_R} e^{iaz} f(z) dz = \int_0^\pi e^{iaR(\cos \phi + i \sin \phi)} f(Re^{i\phi}) Rie^{i\phi} d\phi$$

Przechodzimy do szacowania modułów.

$$\begin{aligned} \left| \int_{C_R} e^{iaz} f(z) dz \right| &\leq \int_0^\pi \left| e^{iaR(\cos \phi + i \sin \phi)} f(Re^{i\phi}) Rie^{i\phi} \right| d\phi \\ &= \int_0^\pi e^{-aR \sin \phi} R \left| f(Re^{i\phi}) \right| d\phi \end{aligned}$$

Pamiętamy, że f jest ciągła, zatem mogę całkę oszacować wstawiając supremum.

$$\begin{aligned} &\leq \underbrace{\sup_{\phi \in [0, \pi]} \left| f(Re^{i\phi}) \right|}_{M(R)} \int_0^\pi e^{-aR \sin \phi} R d\phi \\ &= M(R) 2 \int_0^{\pi/2} e^{-aR \sin \phi} R d\phi \\ &\leq 2M(R) \int_0^{\pi/2} e^{-aR \frac{2}{\pi} \phi} R d\phi \end{aligned}$$

W wykładniku jest już wyraz liniowy, zatem możemy to obliczyć wprost.

$$\begin{aligned} &= -2M(R) R \frac{\pi}{2aR} e^{-aR \frac{2}{\pi} \phi} \Big|_0^{\pi/2} \\ &= M(R) \frac{\pi}{a} (1 - e^{-aR}) \xrightarrow{R \rightarrow \infty} 0 \end{aligned}$$

To kończy nasz dowód, bo dla dolnej płaszczyzny przebiegałby on praktycznie identycznie. ■

Przykład Policzmy $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos x}{(x^2 + a^2)^2} dx$. Założenia lematu Jordana są spełnione.

Aby dostać całkę z Lematu Jordana, to musimy dodać całkę $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{i \sin x}{(x^2 + a^2)^2} dx$. Ta całka jest całką z antysymetrycznej funkcji po symetrycznym odcinku, zatem:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos x}{(x^2 + a^2)^2} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos x + i \sin x}{(x^2 + a^2)^2} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{ix}}{(x^2 + a^2)^2} dx$$

Gdzie naszym $Q(x) = (x^2 + a^2)^{-2}$. Wykładnik jest dodatni, więc całkujemy po górnym okręgu. Ponadto, $(x^2 + a^2)^2 = (z + ia)^2(z - ia)^2$. Więcej tu nie ma do roboty, zatem:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos x}{(x^2 + a^2)^2} dx &= 2\pi i \operatorname{Res}_{ia} \left(\frac{e^{iz}}{(z^2 + a^2)^2} \right) \\ f(z) &= \frac{e^{iz}}{(z - ia)^2(z + ia)^2} = \frac{b_{-2}}{(z - ia)^2} + \frac{b_{-1}}{(z - ia)} + b_0 + b_1(z - ia) + \dots \\ f(z)(z - ia)^2 &= b_{-2} + b_{-1}(z - ia) + b_0(z - ia)^2 + \dots \\ \frac{d}{dz} [f(z)(z - ia)^2] &= b_{-1} + 2b_0(z - ia) + \dots \end{aligned}$$

Stąd,

$$\lim_{z \rightarrow ia} \frac{d}{dz} [f(z)(z - ia)^2] = b_{-1} = \operatorname{Res}_{ia} f(z)$$

Aplikujemy to do naszego przypadku,

$$\begin{aligned} \lim_{z \rightarrow ia} \frac{d}{dz} \left[\frac{e^{iz}}{(z + ia)^2} \right] &= e^{iz} \frac{i(z + ia) - 2}{(z + ia)^3} \Big|_{z=ia} = e^a \frac{-2a - 2}{(2ia)^3} \\ &= e^{-a} \frac{2a + 2}{8ia^3} = e^{-a} \frac{a + 1}{4a^3 i} \end{aligned}$$

Koniec końców,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 2\pi i \frac{a + 1}{4e^a a^3 i}$$

i się skraca, bo powinno wyjść coś rzeczywistego. Jakby się nie skróciło to znak, że mamy gdzieś błąd.

$$= \frac{\pi}{2} \frac{a + 1}{e^a a^3}$$

Twierdzenie 15 (Residuum w biegunie). Jeśli funkcja f ma w z_0 biegun rzędu k , to residuum w punkcie z_0 jest równe

$$\operatorname{Res}_{z_0} f(z) = \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{1}{(k-1)!} \frac{d^{k-1}}{dz^{k-1}} [(z - z_0)^k f(z)]$$

Inne całki

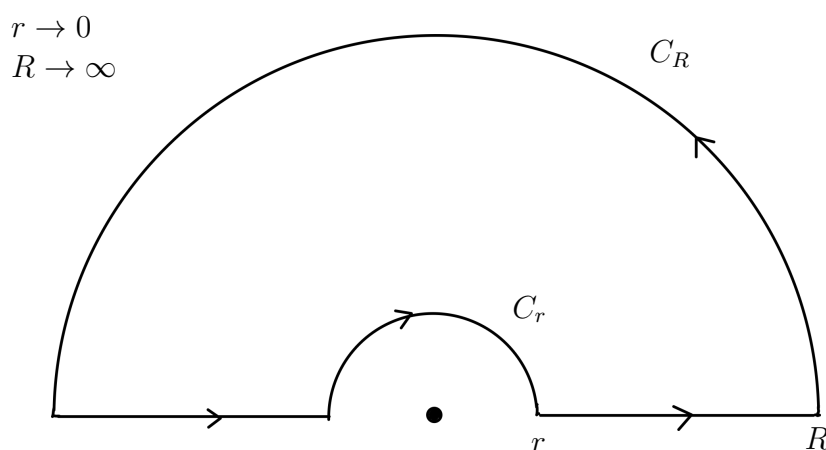
Policzmy $\int_0^\infty \frac{\sin^2 x}{x^2} dx = \frac{\pi}{2}$. Nie jest to całka należąca do listy „standardowych” postępowań.

Jest to całka zbieżna bezwzględnie. Trzeba przerobić funkcję podcałkową na funkcję zespoloną, np. $\sin^2 x = \frac{1}{2}(1 - \cos^2 x) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(1 - e^{2iz})$. Zauważmy również, że funkcja jest parzysta, zatem możemy liczyć ją na całej prostej \mathbb{R} i potem wziąć połowę.

$$\int_0^\infty \frac{\sin^2 x}{x^2} dx = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2 x}{x^2} dx = \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\operatorname{Re}(1 - e^{2iz})}{x^2} dx$$

$$f(z) = \frac{1 - e^{2iz}}{z^2}$$

Wyjściowa funkcja nie miała osobliwości w 0, natomiast $f(z)$ niewątpliwie ma tam biegun rzędu 1, ponieważ w rozwinięciu jedno z z licznika się skróci.



Rysunek 2.11: Kontur „Słom”

$$0 = \oint_{C_R} f(z) dz + \oint_{C_r} f(z) dz + \int_{-R}^{-r} f(x) dx + \int_r^R f(x) dx$$

$$\oint_{C_R} f(z) dz = \oint_{C_R} \frac{dz}{z^2} - \oint_{C_R} \frac{e^{2iz}}{z^2} \xrightarrow{R \rightarrow \infty} 0$$

Pierwsza całka zanika, bo mianownik jest dwa stopnie wyższy od licznika, a druga również easy, bo spełnia założenia lematu Jordana. $f(z)$ ma w $z = 0$ biegun prosty. Rozważmy więc funkcję holomorficzną g taką, że

$$f(z) = \frac{g(z)}{z}$$

Niech Γ_r będzie częścią okręgu od ϕ_0 do ϕ_1 .

$$\int_{\Gamma_r} \frac{g(z)}{z} dz = \int_{\phi_0}^{\phi_1} \frac{g(re^{i\phi})}{re^{i\phi}} rie^{i\phi} d\phi = i \int_{\phi_0}^{\phi_1} g(re^{i\phi}) d\phi$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \int_{\Gamma_r} \frac{g(z)}{z} dz = \lim_{r \rightarrow 0} i \int_{\phi_0}^{\phi_1} g(re^{i\phi}) d\phi$$

Możemy wejść pod całkę, bo funkcja podcałkowa jest holomorficzna, po skończonym odcinku.

$$= i \int_{\phi_0}^{\phi_1} g(0) d\phi = i(\phi_1 - \phi_0)g(0) = \text{Res}_0 f(z)$$

Zauważmy, że to działa tylko jak f ma biegun prosty, bo inaczej nie można by wejść z granicą pod całkę (nie byłoby pod nią funkcji holomorficzej).

$$\oint_{C_r} \frac{1 - e^{2iz}}{z^2} = i(\pi - 0) \text{Res}_0 f$$

$$f(z) = \frac{1 - (1 + 2iz + \frac{1}{2}(2iz)^2 + \dots)}{z^2}$$

$$= -\frac{2i}{z} - \frac{1}{2}(2i)^2 + \dots$$

Stąd,

$$\text{Res}_0 f = -2i$$

$$\oint_{C_r} \frac{1 - e^{2iz}}{z^2} = i\pi(-2\pi) = 2\pi$$

Wracamy do wyjściowej całki I .

$$0 = 4I - 2\pi$$

$$I = \frac{\pi}{2}$$

Przeprowadzone rachunki doprowadzają nas do lematu.

Lemat 2. Niech z_0 będzie biegunem pierwszego rzędu funkcji f . Wtedy,

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{C_\varepsilon} f(z) dz = i\phi \text{Res}_{z_0} f$$

Kiedy to jest biegun wyższego rzędu, to takich całek po częściach okręgu nie można już liczyć w taki sposób.

Rozpoznawanie rodzaju punktów osobliwych funkcji zespolonych jest, jak widać, potrzebne. Możemy dostosować sposób prowadzenia rachunków do konkretnej sytuacji.

Wniosek 14. Niech $f \in \mathcal{A}(\Omega \setminus \{z_0\})$. Punkt z_0 jest osobliwością usuwalną \iff istnieje otoczenie V punktu z_0 takie, że f jest ograniczona na V .

Dowód. Dowód w prawo: oczywisty.

Dowód w lewo: f ograniczona na $V \setminus \{z_0\}$.

$$\lim_{z \rightarrow z_0} (z - z_0)f(z) = 0$$

Gdyż $z - z_0 \rightarrow 0$, a $f(z)$ ograniczone. Niech,

$$g(z) = \begin{cases} (z - z_0)^2 f(z) & z \neq z_0 \\ 0 & z = z_0 \end{cases}$$

$$g'(z_0) = \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{g(z) - g(z_0)}{z - z_0} = \lim_{z \rightarrow z_0} (z - z_0)f(z)$$

Potrafimy policzyć pochodną, zatem $g \in \mathcal{A}(V)$. Możemy ją więc rozwinąć w szereg Taylora w $K(z_0, r) \subset V$.

$$g(z) = \underbrace{g_0}_{g(z_0)=0} + \underbrace{g_1}_{g'(z_0)=0} (z - z_0) + g_2(z - z_0)^2 + \dots$$

$$= (z - z_0)^2 [g_2 + g_3(z - z_0) + \dots]$$

Wyraz w nawiasie to funkcja holomorficzna na $K(z_0, r)$.

$$[g_2 + g_3(z - z_0) + \dots] = \frac{g(z)}{(z - z_0)^2} = f(z)$$

Stąd wniosek, że $f(z)$ jest holomorficzna. ■