

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

Matematika – 1. stopnja

Matej Novoselec

Schwarzov princip zrcaljenja za harmonične funkcije

Delo diplomskega seminarja

Mentor: prof. dr. Barbara Drinovec Drnovšek

Ljubljana, 2023

KAZALO

1. Uvod	3
2. Harmonične funkcije	3
3. Dirichletov problem za enotski disk	4
4. Lastnost povprečne vrednosti	5
5. Schwarzov princip zrcaljenja za harmonične funkcije	6
Literatura	7

1. UVOD

Znotraj diplomske naloge bomo spoznali osnovne lastnosti harmoničnih funkcij, ki jih bomo proti koncu s pridom uporabili za dokaz glavnega izreka, katerega ime nosi naslov naloge. Ves čas se bomo opirali in vlekli številne vzporednice s kompleksno analizo. Gre za področje, močno povezano s študijo harmoničnih funkcij.

V prvem poglavju, bomo spoznali kaj so harmonične funkcije in poudarili, katere njihove lastnosti bodo za nadaljevanje pomembne. Ogledali si bomo tudi njihov odnos s holomorfnimi funkcijami. Znotraj drugega poglavja bomo spoznali Dirichletov problem za enostki disk, ki nam bo dal osnovo za definicijo Poissonovega jedra in Poissonovega integrala. Ogledali si bomo nekaj lastnosti obeh definiranih pojmov in z njuno pomočjo rešili na začetku poglavja zastavljen Dirichletov problem. Tretje poglavje je namenjeno karakterizaciji harmoničnih funkcij s pomočjo lastnosti povprečne vrednosti in analizi pomembnosti te karakterizacije. V zadnjem poglavju, bomo s pomočjo orodij, spoznanih v prejšnjih poglavjih, navedli in dokazali glavni izrek diplomskega dela - Schwarzov princip zrcaljenja za harmonične funkcije.

2. HARMONIČNE FUNKCIJE

Definicija 2.1. Funkcija $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$ je **harmonična**, če velja

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2} + \dots + \frac{\partial^2 u}{\partial x_n^2} = 0.$$

Operatorju $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \dots + \frac{\partial^2}{\partial x_n^2}$ pravimo Laplaceov operator in pišemo

$$\Delta u = 0.$$

Pogoj za harmoničnost funkcije podaja parcialno diferencialno enačbo, zapisano bodisi s Laplaceovim operatorjem ali razpisano s parcialnimi odvodi drugega reda. Drugače rečeno, funkcija je harmonična, če zadošča zgoraj zapisani parcialni diferencialni enačbi. Po tihem tu seveda privzemamo obstoj (vsaj) drugih parcialnih odvodov, saj drugače o harmoničnosti funkcije ne moremo govoriti.

Opomba 2.2. Vredno je omeniti, da nismo specificirali ali gre pri funkciji u , harmoničnost katere bi radi opazovali, za realno ali kompleksno funkcijo. Pojem harmoničnosti smo definirali v splošnem, torej tako za kompleksne, kot tudi realne funkcije.

Opomba 2.3. Znotraj diplomske naloge, se bomo omejili na funkcije dveh realnih spremenljivk, ali funkcijo ene kompleksne spremenljivke, pri čemer bomo nato kompleksno spremenljivko delili na realni in imaginarni del ($z = x + iy$) in na ta način prešli nazaj na funkcije dveh spremenljivk.

Pogoj za harmoničnost takrat zapišemo kot:

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0.$$

V duhu zgornjih dveh opomb, opazimo, da lahko kompleksno funkcijo f , zapišemo v obliki realnega in imaginarnega dela oziroma kot $f = u + iv$, s pomočjo nekaj realnih funkcij (dveh spremenljivk) u in v , ter lahko zaradi linearnosti parcialnih odvodov sklepamo, da je za harmoničnost f kot kompleksne funkcije, dovolj zahtevati harmoničnost u in v kot realnih funkcij. Podoben argument nam da vedeti, da nam harmoničnost $f = u + iv$, implicira tudi harmoničnost u in v .

Opomba 2.4. V literaturi se v definiciji harmoničnosti za funkcijo u pojavlja tudi zahteva, da je funkcija gladka, oziroma $u \in C^\infty$. V zgornji definiciji zahtevamo le obstoj drugih parcialnih odvodov, oziroma $u \in C^2$. Nekoliko kasneje v diplomskem delu, bomo pokazali, da gladkost u ni potrebna predpostavka, saj lahko z nekaj znanja kompleksne analize gladkost u izpeljemo iz harmoničnosti u in s tem pokažemo ekvivalentnost definicij.

3. DIRICHLETOV PROBLEM ZA ENOTSKI DISK

Problem 3.1. Naj bo \mathbb{D} enotski disk. Zvezno kompleksno funkcijo h , definirano na $\partial\mathbb{D}$, razširi do zvezne funkcije \tilde{h} , tako da bo \tilde{h} harmonična na \mathbb{D} in zvezna na $\overline{\mathbb{D}}$, ter se bo zožitev \tilde{h} na $\partial\mathbb{D}$ ujemala s h .

Lema 3.1. Če rešitev za Dirichletov problem na enotskem disku obstaja, je enolično določena.

Dokaz. Denimo, da obstajata dve rešitvi Dirichletovega problema za enotski disk, h_1 in h_2 . Oglejmo si razliko $h_1 - h_2$. Vemo, da je njuna razlika na $\partial\mathbb{D}$ enaka 0, saj so njune vrednosti (kot rešitvi problema) enake vrednostim h . Zaradi harmoničnosti h_1 in h_2 po principu o maksimu za harmonične funkcije vemo, da je njuna razlika ničelna tudi na \mathbb{D} . Sledi enakost h_1 in h_2 tudi na \mathbb{D} in protislovje. \square

Opomba 3.2. Po lemi 3.1, opazimo, da je rešitev problema največ ena, zato se je dovolj posvetiti konstrukciji potencialne rešitve. Opazimo, da lahko spremenljivo $z \in \partial\mathbb{D}$, funkcije h , zamenjamo z $e^{i\theta} \in \partial\mathbb{D}$, ter funkcijo $h(z)$ pišemo kot kompozitum $h(e^{i\theta})$. Poskusimo sedaj skonstruirati (harmonično) razširitev, ki bo zadoščala Dirichletovemu problemu za zvezno funkcijo $h(e^{i\theta})$.

Konstrukcija. Poskusimo željeno razširitev konstruirati za preproste zvezne funkcije h . Oglejmo si primer, ko je funkcija h monom, ter razmislimo ali lahko konstrukcijo posplošimo na polinome, ter nato potencialno na vse zvezne funkcije. V duhu opombe 3.2, si oglejmo funkcije oblike $h(e^{i\theta}) = e^{ik\theta}$, $k \in \mathbb{Z}$ oziroma primer, ko je funkcija h trigonometrični monom. Hitro vidimo, da lahko eksplicitno konstruiramo razširitev $\tilde{h}(re^{i\theta}) = r^{|k|}e^{ik\theta}$, $r \in [0, 1]$. Tako konstruirana razširitev je harmonična na \mathbb{D} , zvezna na $\overline{\mathbb{D}}$ in se na $\partial\mathbb{D}$ res ujema z $h(e^{i\theta})$, torej reši problem. Sedaj uporabimo linearnost in na podoben način skonstruiramo tudi rešitve problema za primere, ko je $h(e^{i\theta})$ trigonometrični polinom. S pomočjo nekaj Fourierove analize in računanja pridemo do eksplicitne formule, za del funkcije definirane na \mathbb{D} , tudi v tem primeru:

$$\tilde{h}(re^{i\theta}) = \int_{-\pi}^{\pi} h(e^{i\phi}) \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} r^{|k|} e^{-ik\phi} e^{ik\theta} \right] \frac{d\phi}{2\pi}, \quad re^{i\theta} \in \mathbb{D}.$$

Tako funkcijo, ki smo jo na intuitiven način konstruirali za primer, ko je h trigonometričen polinom, bomo sedaj vzeli za definicijo in pokazali, da res za vsako zvezno funkcijo h predpis omogoča definicijo razširitve, ki zadošča pogojem Dirichletovega problema za enotski disk.

Definicija 3.3. Poissonovo jedro je funkcija definirana s predpisom

$$P_r(\theta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r^{|k|} e^{ik\theta}, \text{ kjer je } \theta \in [-\pi, \pi] \text{ in } r < 1.$$

Trditev 3.4. Za vsak fiksni $\rho < 1$, vrsta, definirana s Poissonovim jedrom konvergiira enakomerno za vsak $\phi \leq \rho < 1$ in vsak $-\pi \leq \theta \leq \pi$.

Dokaz. Za vsak člen vrste velja $|r^{|k|}e^{ik\phi}| \leq \rho^{|k|} < 1$, zato po Weierstrassovem M-testu velja, da vrsta konvergira enakomerno. \square

Definicija 3.5. Poissonov integral, ki ga označimo z $\tilde{h}(z)$, od $h(e^{i\theta})$ je funkcija, definirana na enotskem disku s predpisom

$$\tilde{h}(z) = \int_{-\pi}^{\pi} h(e^{i\phi}) P_r(\theta - \phi) \frac{d\phi}{2\pi}, \text{ kjer } z = re^{i\theta} \in \mathbb{D}.$$

Trditev 3.6. Naj bo h zvezna kompleksna funkcija definirana na $\partial\mathbb{D}$. Rešitev Dirichletovega problema obstaja in ima vrednosti na \mathbb{D} definirane kot Poissonov integral funkcije h .

Rečeno drugače, Poissonov integral zvezne kompleksne funkcije, definirane na $\partial\mathbb{D}$ je zvezna harmonična funkcija, definirana na \mathbb{D} , ki nam ponuja zvezno harmonično razširitev h na \mathbb{D} , če jo dodefimiramo na \mathbb{D} z njenim Poissonovim integralom.

Dokaz. Diplomaska naloga \square

4. LASTNOST POVPREČNE VREDNOSTI

Definicija 4.1. Zvezna funkcija h , definirana na območju $D \subseteq \mathbb{C}$ ima **lastnost povprečne vrednosti**, če za vsak $z_0 \in D$ obstaja $\epsilon_0 > 0$, da $\overline{\mathbb{D}}(z_0, \epsilon_0) \subseteq D$ in za vsak $0 < \epsilon \leq \epsilon_0$ velja:

$$h(z_0) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} h(z_0 + \epsilon e^{i\theta}) d\theta.$$

Opomba 4.2. Definicija nam pove, da ima zvezna funkcija h , definirana na območju $D \subseteq \mathbb{C}$, lastnost povprečne vrednosti, če za vsak z_0 iz D velja, da je $h(z_0)$ povprečje vrednosti $h(z)$, kjer z teče po majhni krožnici s središčem v z_0 .

Trditev 4.3. Naj bo u harmonična funkcija na območju $D \subseteq \mathbb{C}$. Če velja $\overline{\mathbb{D}}(z_0, \rho) \subseteq D$, potem velja:

$$u(z_0) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(z_0 + re^{i\theta}) d\theta, \text{ kjer } 0 < r < \rho.$$

Dokaz. Diplomaska naloga \square

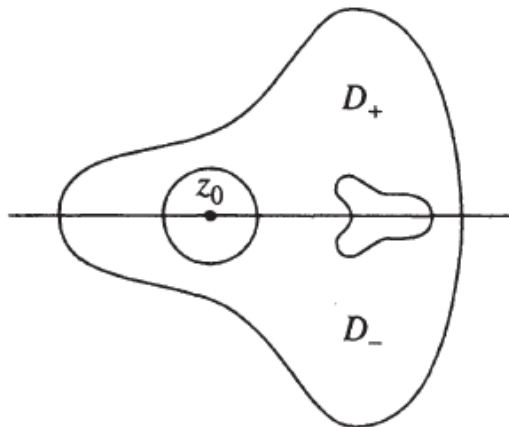
Opomba 4.4. Iz kompleksne analize vemo, da imajo holomorfne funkcije lastnost povprečne vrednosti, zgornja trditev pa nam pove, da imajo lastnost povprečne vrednosti tudi harmonične funkcije. Za harmonične funkcije velja celo več, da se jih namreč karakterizirati s pomočjo lastnosti povprečne vrednosti.

Trditev 4.5. Naj bo h zvezna funkcija, definirana na območju $D \subseteq \mathbb{C}$. Velja, da je h harmonična funkcija, natanko tedaj, ko ima lastnost povprečne vrednosti.

Dokaz. Diplomaska naloga \square

5. SCHWARZOV PRINCIP ZRCALJENJA ZA HARMONIČNE FUNKCIJE

Izrek 5.1. *Naj bo $D \subseteq \mathbb{C}$ območje, simetrično glede na realno os. Označimo $D^+ = D \cap \{Im > 0\}$. Naj bo $u(z) : D^+ \rightarrow \mathbb{R}$ harmonična funkcija, za katero velja, da gre $u(z) \rightarrow 0$, ko gre $z \in D^+$ proti poljubni točki $D \cap \mathbb{R}$. Potem obstaja harmonična razširitev $u(z)$ na D , ki je eksplicitno podana s predpisom $u(\bar{z}) = -u(z)$ za $z \in D$.*



Slika prikazuje glede na \mathbb{R} simetrično območje $D \subseteq \mathbb{C}$. D^+ označuje območje na katerem harmonično funkcijo u poznamo, D^- pa območje na katerem lahko po izreku eksplicitno konstruiramo razširitev. Točka z_0 in "majhen" disk okoli nje, nakazujeta, da se bomo dokaza lotili z lastnostjo povprečne vrednosti.

Dokaz. Dokaz temelji na uporabi karakterizacije harmoničnih funkcij s pomočjo lastnosti povprečne vrednosti, oziroma uporabi le-tega, za dokaz harmoničnosti eksplicitno podane razširitve, za katero trdimo, da je harmonična na D . \square

LITERATURA

- [1] Theodore W. Gamelin *Complex Analysis*, Springer (2001), Chapter X, str. 274 - 288
- [2] Weisstein, Eric W. *Mean-Value Property*, v: From MathWorld—A Wolfram Web Resource, [ogled 22. 2. 2023], dostopno na <https://mathworld.wolfram.com/Mean-ValueProperty.html>