

Pracownia z analizy numerycznej

Sprawozdanie do zadania **P2.19**

Prowadzący: dr hab. prof. Paweł Woźny

Martyna Firgolska, Michał Dymowski

Wrocław, 19 stycznia 2020

Wstęp

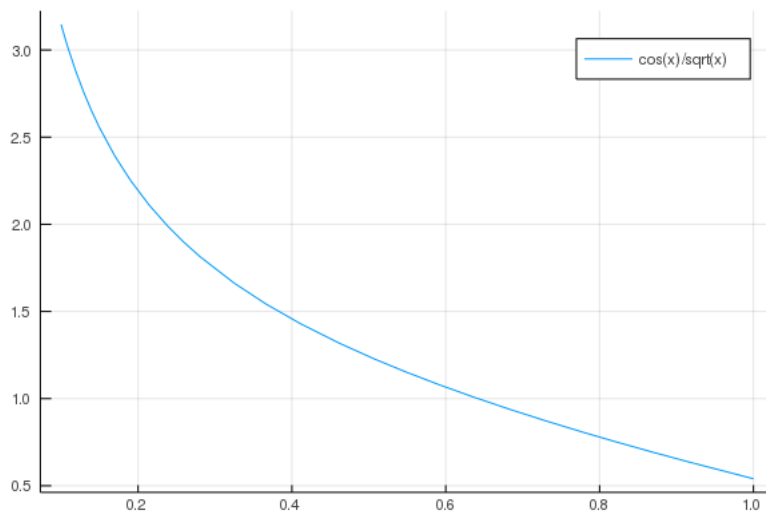
Liczenie wartości całki oznaczonej jest istotnym zagadnieniem matematycznym wykorzystywanym w fizyce i innych naukach ścisłych. Dla niektórych funkcji f jesteśmy w stanie łatwo znaleźć funkcję pierwotną F czyli taką, że $F' = f$. Jeśli umiemy w łatwy sposób obliczyć wartość F w danym punkcie to możemy obliczyć wartość całki oznaczonej: $\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a)$. Niestety dla niektórych funkcji f znalezienie F i jej wartości dla danych punktów nie jest łatwe. Z tego powodu chcielibyśmy w jakiś sposób przybliżać wartości całek oznaczonych obliczając wartości znanej nam funkcji f . Metody numeryczne, które obliczają te przybliżone wartości nazywamy kwadraturami. Poniższe sprawozdanie dotyczy porównania dokładności różnych kwadratur dla niżej opisanych funkcji.

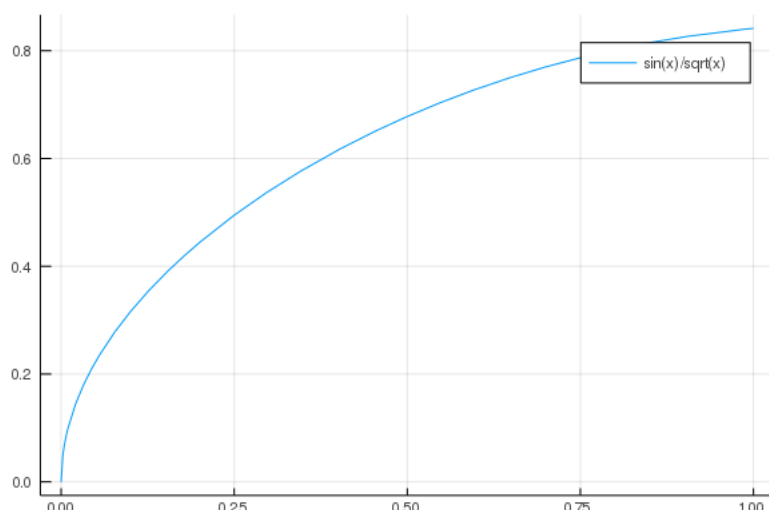
Badane funkcje

W tym sprawozdaniu zbadamy skuteczność różnych metod numerycznych w obliczaniu przybliżonych wartości całek dla funkcji $C = \frac{\cos(x)}{\sqrt{x}}$ i $S = \frac{\sin(x)}{\sqrt{x}}$ na przedziale $[0, 1]$. Całkowane funkcje nie są zdefiniowane w 0, na potrzeby obliczeń przyjmujemy, że wartości tych funkcji w 0 są równe 0.

$$I_C = \int_0^1 \frac{\cos(x)}{\sqrt{x}} dx \approx 1.8090484758005441629... \quad (1)$$

$$I_S = \int_0^1 \frac{\sin(x)}{\sqrt{x}} dx \approx 0.6205366034467622036... \quad (2)$$





Przyjrzyjmy się wykresom badanych funkcji na podanym przedziale. Zauważamy, że C w zerze rozbiega do nieskończoności, a S w zerze zbiega do 0. Reczywiście obliczenie granic daje wyniki zgodne z wykresami funkcji:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos(x)}{\sqrt{x}} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos(0)}{\sqrt{x}} = +\infty \quad (3)$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x)}{\sqrt{x}} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x)}{x} \sqrt{x} = 0 \quad (4)$$

Na podstawie tej informacji możemy przypuszczać, że obliczenie całki I_S będzie łatwiejsze niż obliczenie I_C , ponieważ S jest ograniczona, a jej wartość w 0 zgadza się z jej granicą w tym punkcie. C jest nieograniczona i w zerze przyjmuje 0, ale jej granica w tym punkcie wynosi $+\infty$ zatem obliczenie całki w okolicy 0 może być niedokładne.

Możemy zmienić postać całek I_C i I_S za pomocą podstawienia $x = t^2$ Wtedy:

$$I_C = \int_0^1 \frac{\cos(t^2)}{\sqrt{t^2}} 2t dt = \int_0^1 2\cos(t^2) \quad (5)$$

$$I_S = \int_0^1 \frac{\sin(t^2)}{\sqrt{t^2}} 2t dt = \int_0^1 2\sin(t^2) \quad (6)$$

Otrzymujemy w ten sposób nowe funkcje pod całką $S_{new}(x) = 2\sin(x^2)$ i $C_{new}(x) = 2\cos(x^2)$. Nowe funkcje mają określone wartości dla wszystkich punktach z przedziału $[0, 1]$ i obie funkcje są ograniczone, więc nie mamy takiego problemu jak przy funkcji C .

Metoda trapezów

Metoda trapezów jest kwadraturą wyrażoną wzorem:

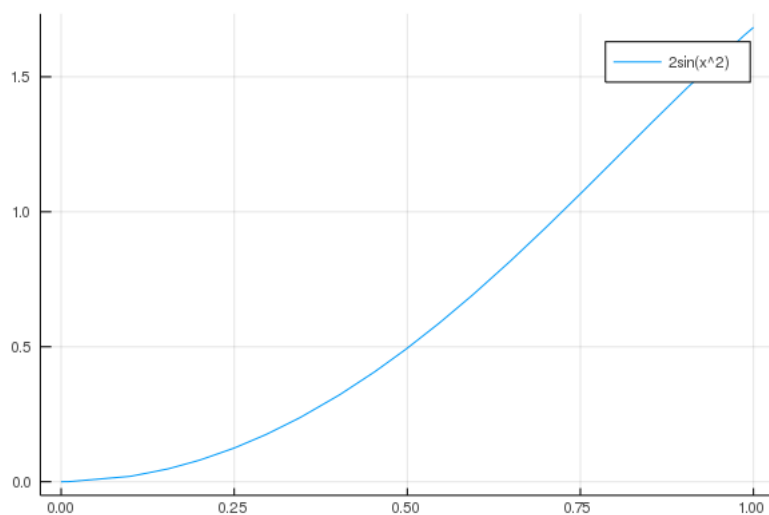
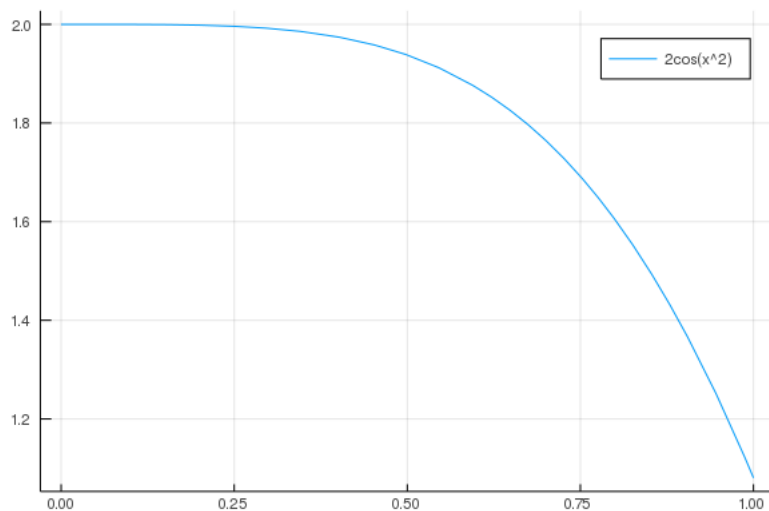
$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{1}{2}(b-a)(f(a) + f(b)) \quad (7)$$

Rozumowanie użyte w tej metodzie jest następujące: skoro nie potrafimy łatwo obliczyć całki funkcji $f(x)$ to zastąpmy ją podobną funkcją, którą potrafimy zcałkować - wielomianem. Stosujemy więc interpolację (np. korzystając z wzoru Lagrange'a) i liczymy całkę z obliczonego wielomianu interpolacyjnego.

$$w(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) l_i(x) \quad (8)$$

gdzie

$$l_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (9)$$



$$\int_a^b f(x)dx \approx \int_a^b w(x)dx = \sum_{i=0}^n f(x_i) \int_a^b l_i(x) \quad (10)$$

Jeśli węzłami interpolacji będą punkty postaci $x_i = a + \frac{b-a}{n}i$ to powyższy wzór nazywamy wzorem Newtona-Cotesa. Dla $n = 1$ czyli interpolując f w 2 punktach: $x_0 = a$ i $x_1 = b$ otrzymujemy wyżej wspomniany wzór trapezów.

Zauważmy, że ta kwadratura jest dokładna dla f , które są wielomianami co najwyżej pierwszego stopnia. Można udowodnić, że błąd metody trapezów wynosi:

$$R = -\frac{1}{12}(b-a)^3 f''(\xi) \quad (11)$$

gdzie $\xi \in (a, b)$. Błąd jest więc zależny od długości przedziału całkowania. Aby uzyskać dokładniejszy wynik możemy podzielić przedział (a, b) na mniejsze przedziały, na przykład na n przedziałów długości $h = \frac{(b-a)}{n}$, i zastosować na każdym z nich wzór trapezów. W ten sposób otrzymujemy złożony wzór trapezów

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{1}{2}h(f(a) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(a + ih) + f(b)) \quad (12)$$

Którego błąd wynosi:

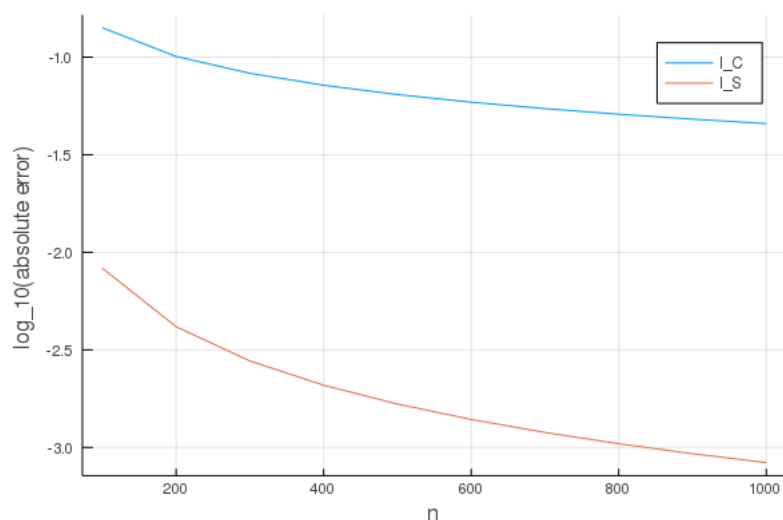
$$R = -\frac{1}{12n^2}(b-a)^3 f''(\xi) \quad (13)$$

gdzie $\xi \in (a, b)$. Metodę nazywamy metodą trapezów, ponieważ geometrycznie możemy myśleć o tym że przybliżamy pole pod wykresem (całkę) trapezami o wierzchołkach w punktach $(a, 0)$, $(a, f(a))$, $(b, 0)$, $(b, f(b))$.

Wyniki obliczania całek za pomocą złożonego wzoru trapezów

| liczba przedziałów | I_C | I_S |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 100 | 1.6677256034277628 | 0.6288262828757042 |
| 200 | 1.7082394599682968 | 0.6246912988653139 |
| 300 | 1.726399997150005 | 0.6233107905275299 |
| 400 | 1.7372928699596446 | 0.6226195323389588 |
| 500 | 1.7447564299910763 | 0.6222043082298286 |
| 600 | 1.750281758632448 | 0.6219272438774593 |
| 700 | 1.7545855714753669 | 0.6217291960934527 |
| 800 | 1.7580609258924103 | 0.6215805696160139 |
| 900 | 1.7609438155984576 | 0.6214649112045778 |
| 1000 | 1.7633856545771385 | 0.6213723429157811 |

Wyniki otrzymane za pomocą metody trapezów są coraz lepsze wraz ze wzrostem n . Zauważamy jednak, że polepszenie wyniku kosztem zwiększenia n (co wiąże się ze zwiększeniem ilości obliczeń - czyli dłuższym obliczaniem wyniku i większymi błędami wynikającymi z zaokrągleń liczb) jest niewielkie. Jak widzimy na rysunku ?? logarytmy błędów maleją dość wolno. Logarytmy dziesiętne błędów oznaczają ile miejsc po przecinku wyniku jest dokładnych. Widzimy więc że w przypadku I_C mamy ok. 1 cyfrę dokładną, a w przypadku I_S mamy około 2 dokładne liczby po przecinku. Zauważamy również, że metoda trapezów gorzej radzi sobie z funkcją C niż z S .



Rysunek 1: logarytm z błędów bezwzględnych obliczenia całek I_C i I_S wzorem złożonym trapezów dla różnych n

Kwadratury Gaussa-Legendre'a

Wagę nazywam funkcję ciągłą, która nie jest tożsamościowo równa 0.

Kwadratura

Metoda całkowania numerycznego polegająca na obliczeniu wartości wyrażenia

$$\sum_{i=0}^n A_i f(x_i) \approx \int_a^b f(x) dx$$

gdzie $x_0, \dots, x_n \in [a, b]$.

Kwadratura Gaussa-Legendre'a

Kwadratura w której węzły x_0, x_1, \dots, x_n są pierwiastkami $n + 1$ -szego wielomianu ortogonalnego w_{n+1} na przedziale $[a, b]$ (z wagą $p \equiv 1$), a współczynniki są równe

$$A_i = \int_a^b \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} dx$$

. O istnieniu wystarczająco wielu pierwiastków wielomianu ortogonalnego, oraz zasadności takiego doboru węzłów mówią następujące twierdzenia:

Twierdzenie 1 *Jeśli niezerowa funkcja $f \in C[a, b]$ jest ortogonalna w tym przedziale z wagą w względem wszystkich wielomianów klasy Π_n , to w (a, b) zmienia znak co najmniej $n + 1$ razy.*

Dowód $1 \equiv w \in \Pi_n$, więc $\int_a^b f(x)w(x)dx = 0$, co oznacza, że f musi zmieniać znak co najmniej raz. Przypuśćmy, że f zmienia znak tylko r razy, gdzie $r \leq n$. Zatem istnieją punkty $a = a_0 < a_1 < \dots < a_{r+1} = b$ takie, że w każdym z przedziałów (a_i, a_{i+1}) funkcja f ma stały znak. Wielomian $\prod_{i=1}^r (x - a_i) = b(x) \in \Pi_n$ ma tę samą własność, więc ponieważ f jest niezerowa, a $f(x)b(x)$ jest ciągła to powinno być $\int_a^b f(x)b(x)w(x)dx \neq 0$, co jest sprzeczne z założeniem, że $\int_a^b f(x)b(x)w(x)dx = 0$.

W szczególności wielomian w_{n+1} spełnia założenia powyższego twierdzenia, więc musi mieć dokładnie $n + 1$ pierwiastków jednokrotnych.

Twierdzenie 2 *Jeśli węzły x_0, x_1, \dots, x_n są zerami $n + 1$ -szego wielomianu ortogonalnego w_{n+1} na przedziale $[a, b]$ z wagą w , to kwadratura o współczynnikach*

$$A_i = \int_a^b w(x) \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} dx$$

jest dokładna dla każdego wielomianu $f \in \Pi_{2n+1}$.

Dowód Niech r będzie resztą z dzielenia wielomianu f przez w_{n+1} : ($q, r \in \Pi_n$)

$$f = qw_{n+1} + r.$$

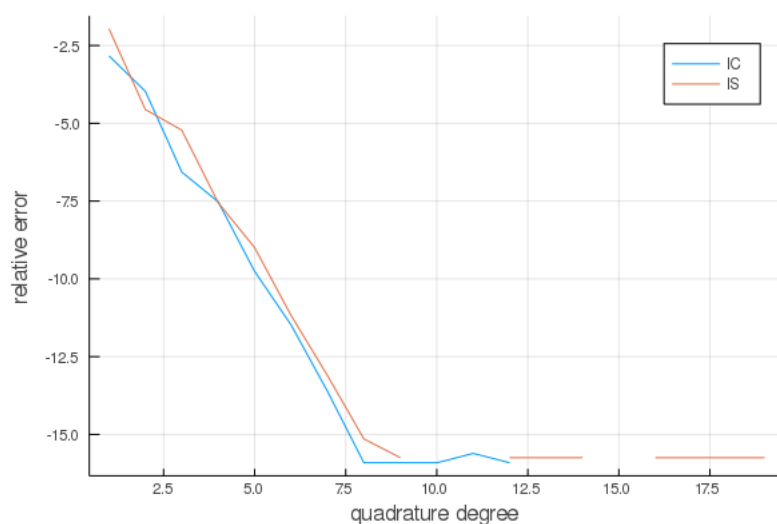
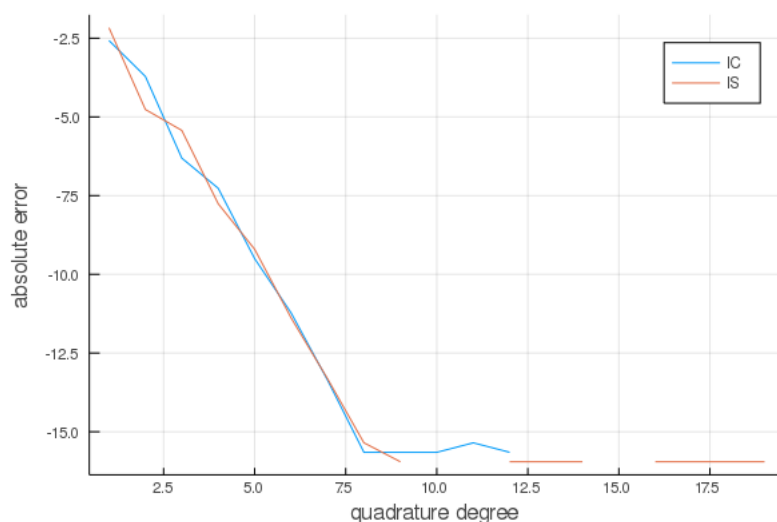
Stąd $r(x_i) = f(x_i)$. Ponieważ kwadratura Gaussa-Legendre'a jest z założenia dokładna dla wielomianów postaci $\sum_{i=0}^n B_i \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}$, to jest dokładna dla wszystkich wielomianów z Π_n . Dla takich wielomianów kwadratura oblicza dokładną wartość całki wielomianu interpolacyjnego danego wielomianu w węzłach x_0, x_1, \dots, x_n . Ponieważ liczba użytych węzłów jest większa niż stopień wyjściowego wielomianu to otrzymany wielomian interpolacyjny jest mu równy. Ponieważ w_{n+1} jest ortogonalny względem wszystkich wielomianów stopnia co najwyżej n , to

$$\int_a^b f(x)w(x)dx = \int_a^b r(x)w(x)dx = \sum_{i=0}^n A_i r(x_i) = \sum_{i=0}^n A_i f(x_i).$$

Nie da się skonstruować kwadratury, która przy użyciu $n + 1$ węzłów będzie dokładna dla wielomianów stopnia wyższego niż $2n + 1$. Niech będą dane pewne $x_0, x_1, \dots, x_n, A_0, A_1, \dots, A_n$, kwadratura $Q(f) = \sum_{i=0}^n A_i f(x_i)$ nie jest dokładna dla wielomianu $\prod_{i=0}^n (x - x_i)^2$.

0.1. Otrzymane wyniki

Kwadratury Gaussa-Legendre'a wykorzystaliśmy do obliczenia wartości całek z funkcji S_{new} i C_{new} równych odpowiednio całkom I_S, I_C .



W punktach, w których wykres błędu bezwzględnego znika obliczona wartość jest równa reprezentacji wartości całki (odpowiednio I_C lub I_S) w arytmetyce Float64. Ciąg kwadratur Gaussa-Legendre'a z funkcji ciągłej na przedziale jest zbieżny do wartości całki z tej funkcji (tw. Stieltjes'a), więc tak długo można się było spodziewać, że używanie kwadratur wyższych stopni będzie poprawiać dokładność otrzymanego wyniku, ale nawet wyniki dla bardzo niskich stopni kwadratur dają rezultaty znacznie dokładniejsze niż wcześniej użyte metody, wymagające wykonania wielokrotnie większej ilości obliczeń.

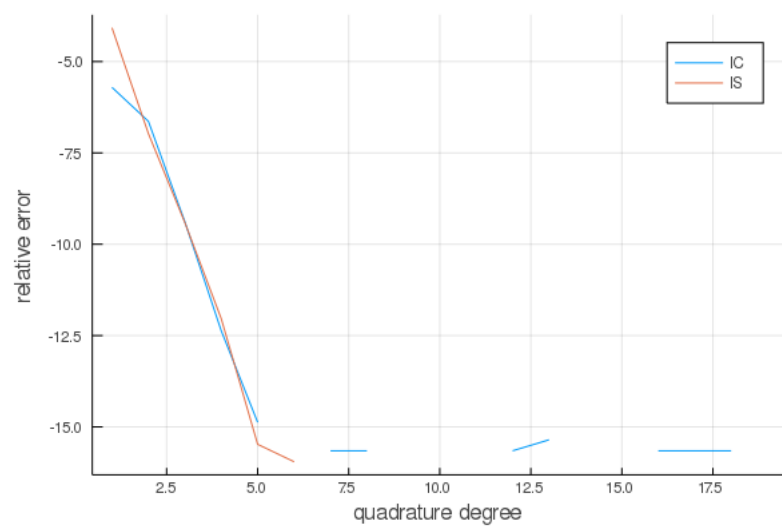
Złożne kwadratury Gaussa-Legendre'a

Dzielimy przedział $[-1, 1]$ n punktami równnodległymi, a następnie całkę z danej funkcji obliczamy osobno na każdym z powstałych $n - 1$ przedziałów, za każdym razem stosując kwadraturę Gaussa-Legendre'a.

Powyżej widać wykres błędu względnego dla kwadratur rozbijających przedział $[-1, 1]$ na trzy podprzedziały. Rozbijanie wyjściowego przedziału na większą ilość podprzedziałów nie wpływa na wyniki w sposób znaczący. Poprawia się jedynie dokładność otrzymanego wyniku dla kwadratur niższych stopni. W przypadku całki I_C otrzymujemy 16 cyfr dokładnych i wynik ten nie poprawia się, nawet gdy używamy ponad 100 podprzedziałów zamiast wyjściowego $[-1, 1]$. Dla 10 i więcej użytych podprzedziałów wyniki otrzymane przy obliczaniu całki I_C jest dokładną wartością I_C w arytmetyce Float64.

Podsumowanie wyników

...



Literatura

- [1] David Kincaid, Ward Cheney *Analiza numeryczna*.
- [2] Wikipedia <https://www.wikipedia.org/>.