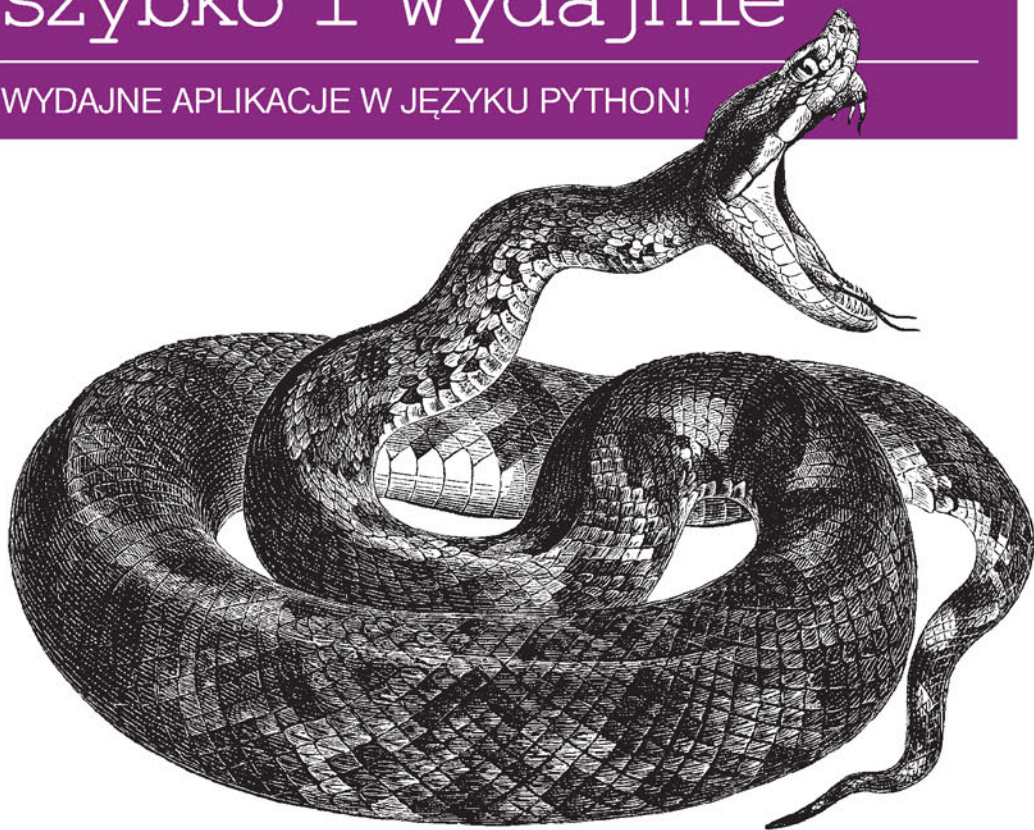


O'REILLY®

# Python

Programuj  
szybko i wydajnie

WYDAJNE APLIKACJE W JĘZYKU PYTHON!



Helion 

Micha Gorelick, Ian Ozsvald

Tytuł oryginału: High Performance Python: Practical Performant Programming for Humans

Tłumaczenie: Piotr Pilch

ISBN: 978-83-283-0466-6

© 2015 Helion S.A.

Authorized Polish translation of the English edition of High Performance Python, ISBN 9781449361594 © 2014 Micha Gorelick and Ian Ozsvald.

This translation is published and sold by permission of O'Reilly Media, Inc., which owns or controls all rights to publish and sell the same.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji w jakiegokolwiek postaci jest zabronione. Wykonywanie kopii metodą kserograficzną, fotograficzną, a także kopiowanie książki na nośniku filmowym, magnetycznym lub innym powoduje naruszenie praw autorskich niniejszej publikacji.

Wszystkie znaki występujące w tekście są zastrzeżonymi znakami firmowymi bądź towarowymi ich właścicieli.

Autor oraz Wydawnictwo HELION dołożyli wszelkich starań, by zawarte w tej książce informacje były kompletne i rzetelne. Nie biorą jednak żadnej odpowiedzialności ani za ich wykorzystanie, ani za związane z tym ewentualne naruszenie praw patentowych lub autorskich. Autor oraz Wydawnictwo HELION nie ponoszą również żadnej odpowiedzialności za ewentualne szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w książce.

Wydawnictwo HELION  
ul. Kościuszki 1c, 44-100 GLIWICE  
tel. 32 231 22 19, 32 230 98 63  
e-mail: [helion@helion.pl](mailto:helion@helion.pl)  
WWW: <http://helion.pl> (księgarnia internetowa, katalog książek)

Drogi Czytelniku!

Jeżeli chcesz ocenić tę książkę, zajrzyj pod adres

<http://helion.pl/user/opinie/pytpsw>

Możesz tam wpisać swoje uwagi, spostrzeżenia, recenzję.

Printed in Poland.

- [Kup książkę](#)
- [Poleć książkę](#)
- [Oceń książkę](#)

- [Księgarnia internetowa](#)
- [Lubię to!» Nasza społeczność](#)

---

# Spis treści

<b>Przedmowa .....</b>	<b>9</b>
<b>1. Wydajny kod Python .....</b>	<b>15</b>
Podstawowy system komputerowy .....	15
Jednostki obliczeniowe .....	16
Jednostki pamięci .....	19
Warstwy komunikacji .....	21
Łączenie ze sobą podstawowych elementów .....	22
Porównanie wyidealizowanego przetwarzania z maszyną wirtualną języka Python .....	23
Dlaczego warto używać języka Python? .....	26
<b>2. Użycie profilowania do znajdowania wąskich gardeł .....</b>	<b>29</b>
Efektywne profilowanie .....	30
Wprowadzenie do zbioru Julii .....	31
Obliczanie pełnego zbioru Julii .....	34
Proste metody pomiaru czasu — instrukcja print i dekorator .....	37
Prosty pomiar czasu za pomocą polecenia time systemu Unix .....	40
Użycie modułu cProfile .....	41
Użycie narzędzia runsnake do wizualizacji danych wyjściowych modułu cProfile .....	46
Użycie narzędzia line_profiler do pomiarów dotyczących kolejnych wierszy kodu .....	46
Użycie narzędzia memory_profiler do diagnozowania wykorzystania pamięci .....	51
Inspekcja obiektów w sterce za pomocą narzędzia heapy .....	56
Użycie narzędzia dowser do generowania aktywnego wykresu dla zmiennych z utworzonymi instancjami .....	58
Użycie modułu dis do sprawdzania kodu bajtowego narzędzia CPython .....	60
Różne metody, różna złożoność .....	62
Testowanie jednostkowe podczas optymalizacji w celu zachowania poprawności .....	64
Dekorator @profile bez operacji .....	64
Strategie udanego profilowania kodu .....	66
Podsumowanie .....	67

<b>3. Listy i krotki .....</b>	<b>69</b>
Bardziej efektywne wyszukiwanie .....	71
Porównanie list i krotek .....	73
Listy jako tablice dynamiczne .....	74
Krotki w roli tablic statycznych .....	77
Podsumowanie .....	78
<b>4. Słowniki i zbiory .....</b>	<b>79</b>
Jak działają słowniki i zbiory? .....	82
Wstawianie i pobieranie .....	82
Usuwanie .....	85
Zmiana wielkości .....	85
Funkcje mieszania i entropia .....	86
Słowniki i przestrzenie nazw .....	89
Podsumowanie .....	92
<b>5. Iteratory i generatory .....</b>	<b>93</b>
Iteratory dla szeregów nieskończonych .....	96
Wartościowanie leniwe generatora .....	97
Podsumowanie .....	101
<b>6. Obliczenia macierzowe i wektorowe .....</b>	<b>103</b>
Wprowadzenie do problemu .....	104
Czy listy języka Python są wystarczająco dobre? .....	107
Problemy z przesadną alokacją .....	109
Fragmentacja pamięci .....	111
Narzędzie perf .....	113
Podejmowanie decyzji z wykorzystaniem danych wyjściowych narzędzia perf .....	115
Wprowadzenie do narzędzia numpy .....	116
Zastosowanie narzędzia numpy w przypadku problemu dotyczącego dyfuzji .....	119
Przydziały pamięci i operacje wewnętrzne .....	121
Optymalizacje selektywne: znajdowanie tego, co wymaga poprawienia .....	124
Moduł numexpr: przyspieszanie i upraszczanie operacji wewnętrznych .....	127
Przeostroża: weryfikowanie „optymalizacji” (biblioteka scipy) .....	129
Podsumowanie .....	131
<b>7. Kompilowanie do postaci kodu C .....</b>	<b>133</b>
Jakie wzrosty szybkości są możliwe? .....	134
Porównanie kompilatorów JIT i AOT .....	136
Dlaczego informacje o typie ułatwiają przyspieszenie działania kodu? .....	136
Użycie kompilatora kodu C .....	137
Analiza przykładu zbioru Julii .....	138
Cython .....	139
Kompilowanie czystego kodu Python za pomocą narzędzia Cython .....	139
Użycie adnotacji kompilatora Cython do analizowania bloku kodu .....	141
Dodawanie adnotacji typu .....	143

Shed Skin .....	147
Tworzenie modułu rozszerzenia .....	148
Koszt związany z kopiami pamięci .....	150
Cython i numpy .....	151
Przetwarzanie równoległe rozwiązania na jednym komputerze z wykorzystaniem interfejsu OpenMP .....	152
Numba .....	154
Pythran .....	155
PyPy .....	157
Różnice związane z czyszczeniem pamięci .....	158
Uruchamianie interpretera PyPy i instalowanie modułów .....	159
Kiedy stosować poszczególne technologie? .....	160
Inne przyszłe projekty .....	162
Uwaga dotycząca układów GPU .....	162
Oczekiwania dotyczące przyszłego projektu kompilatora .....	163
Interfejsy funkcji zewnętrznych .....	163
ctypes .....	164
cffi .....	166
f2py .....	169
Moduł narzędzia CPython .....	171
Podsumowanie .....	174
<b>8. Współbieżność .....</b>	<b>175</b>
Wprowadzenie do programowania asynchronicznego .....	176
Przeszukiwacz szeregowy .....	179
gevent .....	181
tornado .....	185
AsyncIO .....	188
Przykład z bazą danych .....	190
Podsumowanie .....	193
<b>9. Moduł multiprocessing .....</b>	<b>195</b>
Moduł multiprocessing .....	198
Przybliżenie liczby pi przy użyciu metody Monte Carlo .....	200
Przybliżanie liczby pi za pomocą procesów i wątków .....	201
Zastosowanie obiektów języka Python .....	201
Liczby losowe w systemach przetwarzania równoległego .....	208
Zastosowanie narzędzia numpy .....	209
Znajdowanie liczb pierwszych .....	211
Kolejki zadań roboczych .....	217
Weryfikowanie liczb pierwszych za pomocą komunikacji międzyprocesowej .....	221
Rozwiązanie z przetwarzaniem szeregowym .....	225
Rozwiązanie z prostym obiektem Pool .....	225
Rozwiązanie z bardzo prostym obiektem Pool dla mniejszych liczb .....	227
Użycie obiektu Manager.Value jako flagi .....	228

Użycie systemu Redis jako flagi .....	229
Użycie obiektu RawValue jako flagi .....	232
Użycie modułu mmap jako flagi .....	232
Użycie modułu mmap do odtworzenia flagi .....	233
Współużytkowanie danych narzędzia numpy za pomocą modułu multiprocessing .....	236
Synchronizowanie dostępu do zmiennych i plików .....	242
Blokowanie plików .....	242
Blokowanie obiektu Value .....	245
Podsumowanie .....	248
<b>10. Klastry i kolejki zadań .....</b>	<b>249</b>
Zalety klastrowania .....	250
Wady klastrowania .....	251
Strata o wartości 462 milionów dolarów na giełdzie Wall Street z powodu kiepskiej strategii aktualizacji klastra .....	252
24-godzinny przestój usługi Skype w skali globalnej .....	253
Typowe projekty klastrowe .....	254
Metoda rozpoczęcia tworzenia rozwiązania klastrowego .....	254
Sposoby na uniknięcie kłopotów podczas korzystania z klastrów .....	255
Trzy rozwiązania klastrowe .....	257
Użycie modułu Parallel Python dla prostych klastrów lokalnych .....	257
Użycie modułu IPython Parallel do obsługi badań .....	259
Użycie systemu NSQ dla niezawodnych klastrów produkcyjnych .....	262
Kolejki .....	263
Publikator/subskrybent .....	264
Rozproszone obliczenia liczb pierwszych .....	266
Inne warte uwagi narzędzia klastrowania .....	268
Podsumowanie .....	269
<b>11. Mniejsze wykorzystanie pamięci RAM .....</b>	<b>271</b>
Obiekty typów podstawowych są kosztowne .....	272
Moduł array zużywa mniej pamięci do przechowywania wielu obiektów typu podstawowego .....	273
Analiza wykorzystania pamięci RAM w kolekcji .....	276
Bajty i obiekty Unicode .....	277
Efektywne przechowywanie zbiorów tekstowych w pamięci RAM .....	279
Zastosowanie metod dla 8 milionów tokenów .....	280
Wskazówki dotyczące mniejszego wykorzystania pamięci RAM .....	288
Probabilistyczne struktury danych .....	289
Obliczenia o bardzo dużym stopniu przybliżenia z wykorzystaniem jednobajtowego licznika Morrisa .....	290
Wartości k-minimum .....	291
Filtry Blooma .....	295
Licznik LogLog .....	299
Praktyczny przykład .....	303

<b>12. Rady specjalistów z branży .....</b>	<b>307</b>
Narzędzie Social Media Analytics (SoMA) firmy Adaptive Lab .....	307
Język Python w firmie Adaptive Lab .....	308
Projekt narzędzia SoMA .....	308
Zastosowana metodologia projektowa .....	309
Serwisowanie systemu SoMA .....	309
Rada dla inżynierów z branży .....	310
Technika głębokiego uczenia prezentowana przez firmę RadimRehurek.com .....	310
Strzał w dziesiątkę .....	311
Rady dotyczące optymalizacji .....	313
Podsumowanie .....	315
Uczenie maszynowe o dużej skali gotowe do zastosowań produkcyjnych w firmie Lyst.com .....	315
Rola języka Python w witrynie Lyst .....	316
Projekt klastra .....	316
Ewolucja kodu w szybko rozwijającej się nowej firmie .....	316
Budowanie mechanizmu rekomendacji .....	316
Raportowanie i monitorowanie .....	317
Rada .....	317
Analiza serwisu społecznościowego o dużej skali w firmie Smesh .....	318
Rola języka Python w firmie Smesh .....	318
Platforma .....	318
Dopasowywanie łańcuchów w czasie rzeczywistym z dużą wydajnością .....	319
Raportowanie, monitorowanie, debugowanie i wdrażanie .....	320
Interpreter PyPy zapewniający powodzenie systemów przetwarzania danych i systemów internetowych .....	322
Wymagania wstępne .....	322
Baza danych .....	323
Aplikacja internetowa .....	323
Mechanizm OCR i tłumaczenie .....	324
Dystrybucja zadań i procesy robocze .....	324
Podsumowanie .....	325
Kolejki zadań w serwisie internetowym Lanyrd.com .....	325
Rola języka Python w serwisie Lanyrd .....	325
Zapewnianie odpowiedniej wydajności kolejki zadań .....	326
Raportowanie, monitorowanie, debugowanie i wdrażanie .....	326
Rada dla programistów z branży .....	326
<b>Skorowidz .....</b>	<b>329</b>





# Kompilowanie do postaci kodu C

## Pytania, na jakie będziesz w stanie udzielić odpowiedzi po przeczytaniu rozdziału

- Jak możesz sprawić, że kod Python będzie działał jako kod niższego poziomu?
- Jaka jest różnica między kompilatorem JIT i kompilatorem AOT?
- Jakie zadania mogą być wykonywane przez skompilowany kod Python szybciej niż w przypadku zwykłego kodu Python?
- Dlaczego adnotacje typu zwiększają szybkość skompilowanego kodu Python?
- Jak możesz utworzyć moduły dla kodu Python za pomocą języka C lub Fortran?
- Jak możesz użyć w kodzie Python bibliotek języka C lub Fortran?

Najprostszym sposobem przyspieszenia kodu jest ograniczenie liczby operacji, jakie będzie wykonywać. Zakładając, że zostały już wybrane dobre algorytmy i zmniejszono ilość przetwarzanych danych, najprostsza metoda, by wykonywać mniejszą liczbę instrukcji, polega na skompilowaniu kodu do postaci kodu maszynowego.

W tym zakresie język Python oferuje kilka opcji obejmujących narzędzia do kompilowania oparte na czystym kodzie C, takie jak Cython, Shed Skin i Pythran, kompilowanie bazujące na kompilatorze LLVM za pośrednictwem narzędzia Numba oraz zastępczą maszynę wirtualną PyPy, która zawiera wbudowany kompilator JIT (*Just in Time*). Przy podejmowaniu decyzji dotyczącej ścieżki, jaka zostanie obrana, konieczne jest zrównoważenie wymagań związanych z łatwością dostosowania kodu i impetu zespołu.

Każde z wymienionych narzędzi dodaje nową zależność do szeregu używanych narzędzi. Dodatkowo narzędzie Cython wymaga pisania w języku nowego typu (hybrydzie języków Python i C), co wiąże się z koniecznością zdobycia nowej umiejętności. Wykorzystanie nowego języka narzędzia Cython może mieć negatywny wpływ na impet zespołu, ponieważ jego członkowie bez znajomości języka C mogą mieć problem z obsługą takiego kodu. Jednak w praktyce jest to raczej niewielki kłopot, gdyż kod narzędzia Cython będzie używany tylko w dobrze wybranych, niewielkich obszarach kodu.

Godne uwagi jest to, że przeprowadzanie profilowania kodu w odniesieniu do pamięci i procesora prawdopodobnie spowoduje, że zaczniesz się zastanawiać nad optymalizacjami algorytmicznymi wyższego poziomu, które mogą zostać zastosowane. Takie zmiany algorytmiczne (czyli użycie dodatkowej logiki w celu uniknięcia obliczeń lub buforowanie eliminujące ponowne obliczenia) mogą pomóc Ci zapobiegać wykonywaniu w kodzie zbędnych działań. Ekspresywność kodu Python ułatwia zauważenie takich możliwości algorytmicznych. W podrozdziale „Technika głębokiego uczenia prezentowana przez firmę RadimRehurek.com” z rozdziału 12. Radim Řehůřek wyjaśnia, jak implementacja kodu Python może wygrać z czystą implementacją stworzoną w języku C.

W rozdziale dokonamy przeglądu następujących narzędzi:

- Cython — jest to najczęściej używane narzędzie do kompilowania do postaci kodu C, które uwzględnia zarówno narzędzie numpy, jak i zwykły kod Python (wymagana jest znajomość języka C).
- Shed Skin — zautomatyzowany konwerter Python-C przeznaczony dla kodu, który nie bazuje na narzędziu numpy.
- Numba — nowy kompilator stworzony z myślą o kodzie bazującym na narzędziu numpy.
- Pythran — nowy kompilator przeznaczony zarówno dla kodu bazującego na narzędziu numpy, jak i innego kodu.
- PyPy — stabilny kompilator JIT dla kodu, który nie bazuje na narzędziu numpy. Kod taki zastępuje zwykły plik wykonywalny Python.

W dalszej części rozdziału przyjrzymy się interfejsom funkcji zewnętrznych, które umożliwiają skompilowanie kodu C do postaci modułów rozszerzeń dla języka Python. Wbudowany interfejs API tego języka jest używany razem z narzędziami ctypes i cffi (twórców kompilatora PyPy) oraz z konwerterem Fortran-Python f2py.

## Jakie wzrosty szybkości są możliwe?

Jeśli problem związany jest z metodą kompilowania, całkiem prawdopodobne są wzrosty szybkości wynoszące rząd wielkości lub więcej. Przyjrzymy się tutaj różnym metodom osiągnięcia przyspieszeń wynoszących jeden lub dwa rzędy wielkości dla pojedynczego rdzenia, a także w przypadku zastosowania wielu rdzeni za pośrednictwem interfejsu OpenMP.

Kod Python, który zwykle będzie działał szybciej po skompilowaniu, prawdopodobnie służy do zastosowań matematycznych, a ponadto zawiera raczej wiele pętli wielokrotnie powtarzających te same operacje. W obrębie tych pętli możliwe jest tworzenie wielu obiektów tymczasowych.

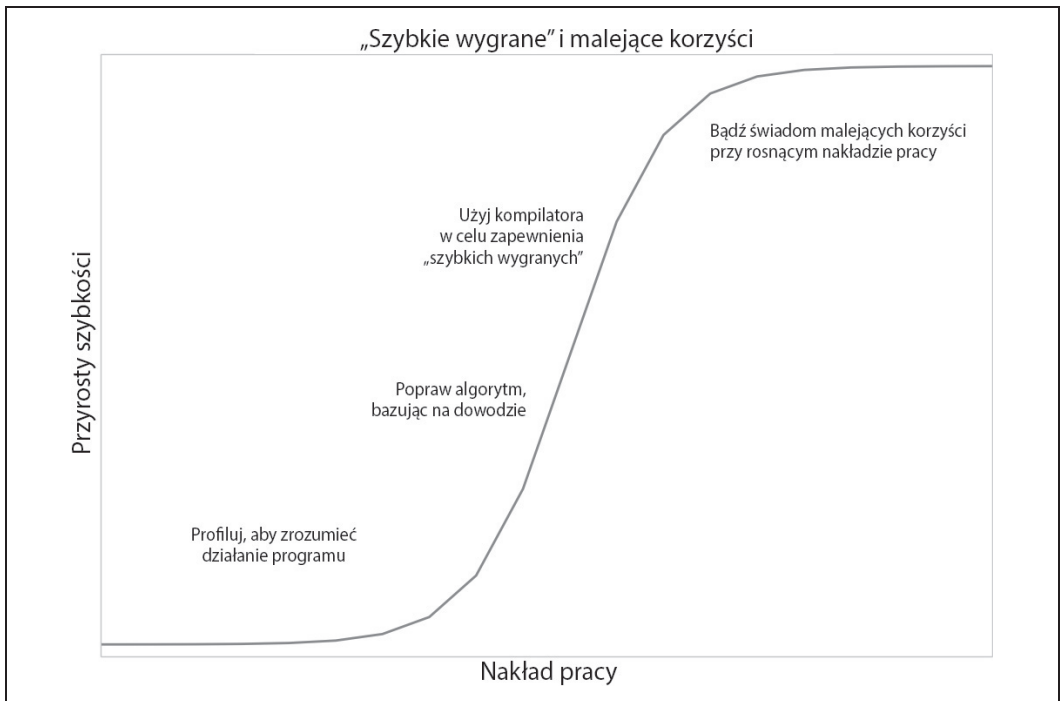
Mało prawdopodobne jest to, że kod wywołujący biblioteki zewnętrzne (np. wyrażenia regularne, operacje na łańcuchach, wywołania bibliotek bazy danych) wykaże jakiegokolwiek przyspieszenie po skompilowaniu. Programy powiązane z operacjami wejścia-wyjścia również raczej nie pozwolą osiągnąć znacznych przyspieszeń.

Jeśli kod Python koncentruje się na wywoływaniu wektoryzowanych funkcji narzędzia numpy, wcale może nie działać szybciej po skompilowaniu. Inaczej będzie tylko wtedy, gdy kompilowany kod to głównie kod Python (a ponadto prawdopodobnie w sytuacji, kiedy w kodzie jest wykonywana pętla). W rozdziale 6. omówiono operacje narzędzia numpy. Okazuje się, że w ich przypadku kompilowanie nie będzie pomocne, ponieważ nie występuje wiele obiektów pośrednich.

Ogólnie rzecz biorąc, bardzo mało prawdopodobne jest to, że skompilowany kod będzie w ogóle szybszy od funkcji napisanej w języku C. Niemniej jednak taki kod nie będzie też działał znacznie wolniej. Całkiem możliwe jest to, że kod C wygenerowany z kodu Python będzie działał tak samo szybko jak ręcznie napisana funkcja C, chyba że programista używający języka C dysponuje szczególnie dużą wiedzą na temat metod dostrajania kodu C do architektury docelowej platformy sprzętowej.

W przypadku kodu stworzonego z myślą o operacjach matematycznych możliwe jest, że ręcznie stworzona funkcja języka Fortran przewyższy odpowiadającą jej funkcję C. Jednakże i tym razem będzie to raczej wymagać wiedzy eksperckiej. Generalnie rzecz biorąc, wynik kompilacji (uzyskany prawdopodobnie z wykorzystaniem narzędzia Cython, Pythran lub Shed Skin) będzie zbliżony do wyniku dla ręcznie napisanego kodu C w stopniu wymaganym przez większość programistów.

Podczas profilowania algorytmu i korzystania z niego trzeba pamiętać o diagramie z rysunku 7.1. Trochę czasu poświęconego na zrozumienie kodu poprzez jego profilowanie powinno dać możliwość podjęcia lepszych decyzji na poziomie algorytmicznym. Skoncentrowanie się w dalszej kolejności na kompilatorze powinno zaowocować dodatkowym przyspieszeniem. Prawdopodobnie możliwe będzie dalsze dostrajanie algorytmu, ale nie należy być zaskoczonym coraz mniejszymi przyspieszeniami wynikającymi z coraz większej ilości włożonej pracy. Trzeba samemu stwierdzić, kiedy dodatkowe starania przestaną być opłacalne.



Rysunek 7.1. Trochę czasu poświęconego na profilowanie i kompilowanie zapewnia spore korzyści, ale dalsze działania zwykle są coraz mniej opłacalne

Jeśli używasz kodu Python i całej grupy dołączonych bibliotek bez narzędzia `numpy`, podstawowymi opcjami wyboru będą narzędzia `Cython`, `Shed Skin` i `PyPy`. Jeśli używasz narzędzia `numpy`, odpowiednimi propozycjami są narzędzia `Cython`, `Numba` i `Pythran`. Obsługują one język Python 2.7, a część z nich jest też zgodna z językiem Python w wersji 3.2 lub nowszej.

Niektóre z przedstawionych dalej przykładów wymagają ogólnej znajomości kompilatorów kodu C oraz samego kodu C. W przypadku braku takiej wiedzy przed zagłębieniem się w tę tematykę powinieneś w podstawowym zakresie poznać język C i skompilować działający program napisany w tym języku.

## Porównanie kompilatorów JIT i AOT

Omawiane narzędzia można podzielić na dwie grupy: służące do wcześniejszego kompilowania (kompilatory AOT: `Cython`, `Shed Skin`, `Pythran`) oraz do kompilowania przy pierwszej próbie użycia kodu (kompilatory JIT: `Numba`, `PyPy`).

Kompilowanie za pomocą kompilatora AOT (*Ahead of Time*) powoduje utworzenie biblioteki statycznej przeznaczonej dla używanej platformy sprzętowej. Po pobraniu narzędzia `numpy`, `scipy` lub `scikit-learn` nastąpi skompilowanie przez jedno z nich części biblioteki z wykorzystaniem kompilatora `Cython` na danej platformie sprzętowej (ewentualnie w przypadku użycia dystrybucji takiej jak `Continuum Anaconda`, zostanie zastosowana wcześniej zbudowana biblioteka kompilowana). Dzięki kompilacji kodu przed jego użyciem uzyskuje się bibliotekę, która może od razu zostać zastosowana przy rozwiązywaniu problemu.

Kompilowanie za pomocą kompilatora JIT (*Just in Time*) w dużym stopniu (lub całkowicie) eliminuje początkowe działania. Kompilator może rozpocząć kompilację tylko odpowiednich części kodu w momencie ich użycia. Oznacza to wystąpienie problemu zimnego startu. Polega on na tym, że może wystąpić sytuacja, gdy większość kodu programu została już skompilowana, a aktualnie używana porcja kodu jeszcze nie, więc w momencie rozpoczynania uruchamiania kodu w czasie trwania kompilacji będzie on działał bardzo wolno. Jeśli ma to miejsce każdorazowo przy uruchamianiu skryptu, który jest uaktywniany wielokrotnie, związany z tym spadek wydajności może stać się znaczny. Ponieważ problem ten dotyczy kompilatora `PyPy`, korzystanie z niego w przypadku krótkich, lecz często wykonywanych skryptów może okazać się niepożądane.

W tym miejscu omówienia widać, że wcześniejsze kompilowanie daje korzyść w postaci najlepszych przyspieszeń, ale często wymaga też największego nakładu pracy. Kompilatory JIT oferują duże przyspieszenia przy bardzo małej liczbie ręcznie wprowadzanych zmian, ale mogą powodować opisany problem. Przy wyborze właściwej technologii na potrzeby konkretnego zastosowania konieczne będzie rozważenie tych kwestii.

## Dlaczego informacje o typie ułatwiają przyspieszenie działania kodu?

W języku Python typy są dynamicznie określone. Zmienna może odwoływać się do obiektu dowolnego typu, a dowolny wiersz kodu może zmienić typ przywoływanego obiektu. Utrudnia to maszynie wirtualnej optymalizację metody wykonywania kodu na poziomie kodu maszynowego,

ponieważ nie dysponuje ona informacją o tym, jaki podstawowy typ danych będzie używany dla przyszłych operacji. Utrzymywanie kodu w uogólnionej postaci powoduje, że będzie on dłużej wykonywany.

W poniższym przykładzie `v` identyfikuje liczbę zmiennoprzecinkową lub parę takich liczb, które reprezentują liczbę zespoloną `complex`. Oba warunki mogą wystąpić w tej samej pętli w różnym czasie lub w powiązanych kolejnych sekcjach kodu:

```
v = -1.0
print type(v), abs(v)
<type 'float'> 1.0
v = 1-1j
print type(v), abs(v)
<type 'complex'> 1.41421356237
```

Funkcja `abs` działa różnie w zależności od bazowego typu danych. Funkcja ta użyta dla liczby całkowitej lub zmiennoprzecinkowej po prostu powoduje przekształcenie wartości ujemnej w wartość dodatnią. W przypadku liczby zespolonej funkcja `abs` pobiera pierwiastek kwadratowy sumy elementów podniesionych do kwadratu:

$$abs(c) = \sqrt{c.real^2 + c.imag^2}$$

Kod maszynowy dla przykładu liczby zespolonej `complex` uwzględnia więcej instrukcji i do wykonania wymaga więcej czasu. Przed wywołaniem funkcji `abs` dla zmiennej interpreter języka Python musi najpierw poszukać typu zmiennej, a następnie zdecydować, jaką wersję funkcji wywołać. Związane z tym obciążenie zwiększa się w przypadku wykonywania wielu powtarzanych wywołań.

W obrębie kodu Python każdy podstawowy obiekt, taki jak liczba całkowita, zostanie opakowany za pomocą obiektu języka Python wyższego poziomu (np. za pomocą obiektu `int` w przypadku liczby całkowitej). Tego rodzaju obiekt oferuje dodatkowe funkcje, takie jak `__hash__` (ułatwia przechowywanie) i `__str__` (obsługuje wyświetlanie łańcuchów).

Wewnątrz sekcji kodu powiązanego z procesorem częstą sytuacją jest to, że typy zmiennych nie zmieniają się. Daje to możliwość zastosowania kompilacji statycznej i szybszego wykonywania kodu.

Jeśli wymaganych jest jedynie wiele pośrednich operacji matematycznych, nie są potrzebne funkcje wyższego poziomu, a ponadto mogą być zbędne mechanizmy służące do zliczania odwołań. W tym przypadku można po prostu przejść do poziomu kodu maszynowego i przeprowadzić szybko obliczenia przy użyciu kodu maszynowego i bajtów, a nie poprzez modyfikowanie obiektów wyższego poziomu języka Python, z czym wiąże się większe obciążenie. W tym celu wcześniej określane są typy obiektów, aby możliwe było wygenerowanie poprawnego kodu C.

## Użycie kompilatora kodu C

W dalszych przykładach zostaną zastosowane kompilatory `gcc` i `g++` z zestawu narzędziowego GNU C Compiler. Jeśli poprawnie skonfigurujesz środowisko, możesz skorzystać z alternatywnego kompilatora (np. `icc` Intel lub `cl` Microsoftu). Narzędzie Cython korzysta z kompilatora `gcc`, a narzędzie Shed Skin używa kompilatora `g++`.

Kompilator gcc stanowi znakomity wybór w przypadku większości platform, ponieważ jest dobrze obsługiwany i dość zaawansowany. Często możliwe jest uzyskanie większej wydajności za pomocą dostrojonego kompilatora (np. w przypadku urządzeń Intel'a kompilator icc tej firmy może wygenerować szybszy kod niż kompilator gcc), ale wiąże się to z koniecznością poszerzenia wiedzy specjalistycznej i uzyskania informacji o sposobie dostosowywania flag dla alternatywnego kompilatora.

Języki C i C++ często są używane do kompilacji statycznej w miejsce innych języków, takich jak Fortran, ze względu na ich wszechobecność i bogatą gamę bibliotek pomocniczych. Kompilator i konwerter (w tym przypadku konwerterem jest narzędzie Cython i inne podobne) mają możliwość analizowania kodu z adnotacją w celu określenia, czy mogą zostać zastosowane kroki optymalizacji statycznej (np. wstawianie funkcji i rozwijanie pętli). Agresywna analiza pośredniego drzewa składni abstrakcyjnej (przeprowadzana przez narzędzia Pythran, Numba i PyPy) zapewnia możliwości łączenia wiedzy o tym, jak w języku Python wyrażane są informacje o najlepszej metodzie wykorzystania napotkanych wzorców w celu przekazania ich bazowemu kompilatorowi.

## Analiza przykładu zbioru Julii

W rozdziale 2. dokonano profilowania generatora zbioru Julii. Użyty kod generuje obraz wyjściowy z wykorzystaniem liczb całkowitych i liczb zespolonych. Obliczenia obrazu są powiązane z procesorem.

Główne obciążenie związane z wykonywaniem kodu miało postać powiązanej z procesorem pętli wewnętrznej, która oblicza listę output. Lista może mieć postać kwadratowej tablicy pikseli, w której każda wartość reprezentuje koszt wygenerowania piksela.

Kod funkcji wewnętrznej został zaprezentowany w przykładzie 7.1.

*Przykład 7.1. Analiza powiązanego z procesorem kodu funkcji zbioru Julii*

```
def calculate_z_serial_purepython(maxiter, zs, cs):
    """Obliczanie listy output za pomocą reguły aktualizacji zbioru Julii"""
    output = [0] * len(zs)
    for i in range(len(zs)):
        n = 0
        z = zs[i]
        c = cs[i]
        while n < maxiter and abs(z) < 2:
            z = z * z + c
            n += 1
        output[i] = n
    return output
```

W przypadku laptopa jednego z autorów obliczenie oryginalnego zbioru Julii dla siatki 1000×1000 przy wartości maxit równej 300 zajęło w przybliżeniu 11 sekund (użyto implementacji czystego kodu Python wykonywanego za pomocą narzędzia CPython 2.7).

# Cython

Cython (<http://cython.org/>) to kompilator, który przekształca kod Python z adnotacją typu w skompilowany moduł rozszerzenia. Adnotacje typu przypominają te stosowane w języku C. Takie rozszerzenie może być importowane za pomocą narzędzia `import` jako zwykły moduł języka Python. Choć rozpoczęcie działań nie przysparza trudności, wiąże się z tym konieczność poszerzania wiedzy w coraz większym stopniu wraz z każdym dodatkowym poziomem złożoności i optymalizacji. Przez jednego z autorów narzędzie to jest wykorzystywane do przekształcania funkcji wymagających wielu obliczeń w szybszy kod. Wybrał to narzędzie z powodu jego powszechnego użycia, dojrzałości i obsługi interfejsu OpenMP.

W przypadku standardu OpenMP możliwe jest radzenie sobie z problemami dotyczącymi przetwarzania równoległego poprzez zastosowanie modułów obsługujących wieloprocesorowość, które są uruchamiane w wielu procesorach jednego komputera. Wątki są ukrywane przed kodem Python. Działają za pośrednictwem wygenerowanego kodu C.

Kompilator Cython (opublikowany w 2007 r.) wywodzi się z kompilatora Pyrex (wprowadzonego w 2002 r.). Cython rozszerza możliwości pierwotnych zastosowań kompilatora Pyrex. Biblioteki, które używają kompilatora Cython, to: `scipy`, `scikit-learn`, `lxml` i `zmq`.

Kompilator Cython może być stosowany za pośrednictwem skryptu `setup.py` do kompilacji modułu. Może też zostać użyty interaktywnie w powłoce IPython, co umożliwi „magiczne” polecenie. Adnotacja typów jest zwykle przeprowadzana przez programistę, choć możliwa jest pewna forma zautomatyzowanego tworzenia adnotacji.

## Kompilowanie czystego kodu Python za pomocą narzędzia Cython

Prosta metoda rozpoczęcia tworzenia skompilowanego modułu rozszerzenia uwzględnia trzy pliki. W przypadku użycia zbioru Julii jako przykładu są to następujące pliki:

- Plik wywołującego kodu Python (spora część wcześniej przedstawionego kodu zbioru Julii).
- Nowy plik `.pyx` z funkcją do skompilowania.
- Plik `setup.py`, który zawiera instrukcje wywołujące kompilator Cython do utworzenia modułu rozszerzenia.

Przy użyciu tej metody wywoływany jest skrypt `setup.py` w celu wykorzystania kompilatora Cython do skompilowania pliku `.pyx` do postaci skompilowanego modułu. W systemach uniksowych skompilowany moduł będzie prawdopodobnie plikiem `.so`. W systemie Windows powinien to być plik `.pyd` (biblioteka języka Python przypominająca bibliotekę DLL).

W przypadku przykładu zbioru Julii zostaną zastosowane następujące pliki:

- `julia1.py`. Służy do zbudowania list wejściowych i wywołania funkcji obliczeniowej.
- `cythonfn.pyx`. Zawiera funkcję powiązaną z procesorem, dla której można utworzyć adnotację.
- `setup.py`. Zawiera instrukcje procesu budowania.

Wynikiem uruchomienia skryptu `setup.py` jest możliwy do zaimportowania moduł. W skrypcie `julia1.py` z przykładu 7.2 wymagane jest jedynie wprowadzenie kilku drobnych zmian w celu zaimportowania nowego modułu za pomocą instrukcji `import` i wywołania funkcji.



Przykład 7.2. Importowanie nowo skompilowanego modułu do głównego kodu

```
...
import calculate # zgodnie z definicją w skrypcie setup.py
...
def calc_pure_python(desired_width, max_iterations):
    # ...
    start_time = time.time()
    output = calculate.calculate_z(max_iterations, zs, cs)
    end_time = time.time()
    secs = end_time - start_time
    print "Czas trwania:", secs, "s"
...
```

W przykładzie 7.3 zaczniemy od czystego kodu Python bez adnotacji typu.

Przykład 7.3. Niezmieniony czysty kod Python z pliku `cythonfn.pyx` (ze zmienionym rozszerzeniem na `.py`) dla skryptu `setup.py` kompilatora Cython

```
# cythonfn.pyx
def calculate_z(maxiter, zs, cs):
    """Obliczanie listy output za pomocą reguły aktualizacji zbioru Julii"""
    output = [0] * len(zs)
    for i in range(len(zs)):
        n = 0
        z = zs[i]
        c = cs[i]
        while n < maxiter and abs(z) < 2:
            z = z * z + c
            n += 1
        output[i] = n
    return output
```

Skrypt `setup.py` z przykładu 7.4 jest krótki. Zdefiniowano w nim sposób przekształcenia pliku `cythonfn.pyx` w plik `calculate.so`.

Przykład 7.4. Skrypt `setup.py` przekształca plik `cythonfn.pyx` w kod C, który ma zostać skompilowany przez kompilator Cython

```
from distutils.core import setup
from distutils.extension import Extension
from Cython.Distutils import build_ext
setup(
    cmdclass = {'build_ext': build_ext},
    ext_modules = [Extension("calculate", ["cythonfn.pyx"])]
)
```

Po uruchomieniu skryptu `setup.py` z przykładu 7.5 z argumentem `build_ext` kompilator Cython poszuka pliku `cythonfn.pyx` i utworzy plik `calculate.so`.

Przykład 7.5. Uruchamianie skryptu `setup.py` w celu zbudowania nowo skompilowanego modułu

```
$ python setup.py build_ext --inplace
running build_ext
cythoning cythonfn.pyx to cythonfn.c
building 'calculate' extension
gcc -pthread -fno-strict-aliasing -DNDEBUG -g -fwrapv -O2 -Wall
-Wstrict-prototypes -fPIC -I/usr/include/python2.7 -c cythonfn.c
-o build/temp.linux-x86_64-2.7/cythonfn.o
gcc -pthread -shared -Wl,-O1 -Wl,-Bsymbolic-functions -Wl,
-Bsymbolic-functions -Wl,-z,
relro build/temp.linux-x86_64-2.7/cythonfn.o -o calculate.so
```





Pamiętaj o tym, że jest to krok wykonywany ręcznie. Gdy zaktualizujesz plik `.pyx` lub `setup.py` i zapomnisz ponownie uruchomić polecenie do budowania, nie będzie dostępny zaktualizowany moduł `.so` do zaimportowania. Jeśli nie masz pewności, czy kod został skompilowany, sprawdź znacznik czasu pliku `.so`. W razie wątpliwości usuń wygenerowane pliki kodu C oraz plik `.so`, a następnie zbuduj je ponownie.

Argument `--inplace` nakazuje kompilatorowi Cython zbudowanie skompilowanego modułu w bieżącym katalogu, a nie w osobnym katalogu `build`. Po zakończeniu procesu budowania dostępny będzie plik `cythonfn.c`, który jest raczej mało czytelny, a także plik `calculate.so`.

Po uruchomieniu kodu z pliku `julia1.py` importowany jest skompilowany moduł. Na laptopie jednego z autorów zbiór Julii został obliczony w czasie wynoszącym 8,9 sekundy, a nie w bardziej typowym czasie równym 11 sekund. Jest to niewielki wzrost wydajności kosztem znikomego nakładu pracy.

## Użycie adnotacji kompilatora Cython do analizowania bloku kodu

W poprzednim przykładzie pokazano, że możliwe jest szybkie zbudowanie skompilowanego modułu. W przypadku intensywnych pętli i operacji matematycznych już samo to często prowadzi do wzrostu szybkości. Oczywiście nie należy po omacku przeprowadzać optymalizacji. Konieczne jest stwierdzenie, jaka część kodu jest wolna, aby możliwe było zdecydowanie o tym, co wymaga większego nakładu pracy.

Kompilator Cython oferuje opcję tworzenia adnotacji, która zapewnia plik wyjściowy HTML możliwy do wyświetlenia w przeglądarce. Do wygenerowania adnotacji używane jest polecenie `cython -a cythonfn.pyx`, które generuje plik wyjściowy `cythonfn.html`. Po wyświetleniu w przeglądarce zawartość pliku przypomina widoczną na rysunku 7.2. Podobny rysunek jest dostępny w *dokumentacji kompilatora Cython* (<http://docs.cython.org/src/quickstart/cythonize.html>).

```
Generated by Cython 0.21.1

Raw output: cythonfn.c

+01: def calculate_z(maxiter, zs, cs):
+02:     """Obliczanie listy output za pomocą reguły aktualizacji zbioru Julii"""
+03:     output = [0] * len(zs)
+04:     for i in range(len(zs)):
+05:         n = 0
+06:         z = zs[i]
+07:         c = cs[i]
+08:         while n < maxiter and abs(z) < 2:
+09:             z = z * z + c
+10:             n += 1
+11:         output[i] = n
+12:     return output
```

Rysunek 7.2. Kolorem wyróżniono dane wyjściowe funkcji bez adnotacji uzyskane za pomocą kompilatora Cython

Dwukrotne kliknięcie każdego wiersza powoduje jego rozwinięcie i wyświetlenie wygenerowanego kodu C. Intensywniejszy żółty kolor oznacza więcej wywołań w obrębie maszyny wirtualnej języka Python, bardziej białe wiersze natomiast wskazują na kod C, który w mniejszym stopniu przypomina kod Python. Celem jest usunięcie jak największej liczby żółtych wierszy i zakończenie działań z jak najmniejszą liczbą białych wierszy.

Choć bardziej żółte wiersze oznaczają więcej wywołań w obrębie maszyny wirtualnej, niekoniecznie spowoduje to wolniejsze działanie kodu. Każde wywołanie w maszynie wirtualnej wiąże się z obciążeniem, ale dla wszystkich takich wywołań będzie ono znaczne tylko w przypadku wywołań występujących wewnątrz dużych pętli. Wywołania poza obrębem dużych pętli (np. wiersz kodu używany do utworzenia listy output na początku funkcji) nie są kosztowne w porównaniu z kosztem obliczeń w pętli wewnętrznej. Nie marnuj czasu na wiersze, które nie powodują spowolnienia kodu.

W przykładzie wiersze z największą liczbą wywołań w obrębie maszyny wirtualnej języka Python (najbardziej żółte) mają numery 4 i 8. Na podstawie wyników dotychczasowych operacji profilowania można stwierdzić, że wiersz 8. zostanie prawdopodobnie wywołany ponad 30 milionów razy, dlatego jest znakomitym kandydatem do tego, by się na nim skoncentrować.

Wiersze 9., 10. i 11. są prawie żółte. Ponadto wiadomo, że znajdują się w środku intensywnej pętli wewnętrznej. Ogólnie rzecz biorąc, odpowiadają za sporą część czasu wykonywania funkcji. Z tego powodu w pierwszej kolejności trzeba się nimi zająć. Jeśli musisz przypomnieć sobie, ile czasu trwało wykonywanie tej sekcji kodu, zajrzyj do podrozdziału „Użycie narzędzia `line_profiler` do pomiarów dotyczących kolejnych wierszy kodu” z rozdziału 2.

Wiersze 6. i 7. są mniej żółte. Ponieważ są wywoływane tylko milion razy, mają znacznie mniejszy wpływ na końcową szybkość. Oznacza to, że później można skupić uwagę na nich. Okazuje się, że ponieważ są one obiektami list, właściwie nic nie można zrobić, aby skrócić czas dostępu do nich. Jak wspomniano w podrozdziale „Cython i numpy”, wyjątkiem jest operacja polegająca na zastąpieniu obiektów list tablicami narzędzia `numpy`, które zapewnią niewielki przyrost szybkości.

Aby lepiej zrozumieć żółte obszary, możesz rozwinąć każdy wiersz przez dwukrotne kliknięcie. Na rysunku 7.3 widać, że do utworzenia listy output iterowana jest długość elementu `zs`. Powoduje to utworzenie obiektów języka Python, w przypadku których maszyna wirtualna tego języka zlicza odwołania. Choć te wywołania są kosztowne, tak naprawdę nie mają wpływu na czas wykonywania tej funkcji.

```
Generated by Cython 0.21.1

Raw output: cythonfn.c

+01: def calculate_z(maxiter, zs, cs):
+02:     """Obliczanie listy output za pomocą reguły aktualizacji zbioru Julii"""
+03:     output = [0] * len(zs)
    __pyx_t_1 = PyObject_Length(__pyx_v_zs); if (unlikely(__pyx_t_1 == -1)) {__pyx_filename = __pyx_f[0]; __pyx_l_1
    __pyx_t_2 = PyList_New(1 * ((__pyx_t_1 < 0) ? 0: __pyx_t_1)); if (unlikely(!__pyx_t_2)) {__pyx_filename = __pyx_
    __Pyx_GOTREF(__pyx_t_2);
    { Py_ssize_t __pyx_temp;
      for (__pyx_temp=0; __pyx_temp < __pyx_t_1; __pyx_temp++) {
        __Pyx_INCREF(__pyx_int_0);
        PyList_SET_ITEM(__pyx_t_2, __pyx_temp, __pyx_int_0);
        __Pyx_GIVEREF(__pyx_int_0);
      }
    }
    __pyx_v_output = ((PyObject*)__pyx_t_2);
    __pyx_t_2 = 0;
+04:     for i in range(len(zs)):
+05:         n = 0
+06:         z = zs[i]
+07:         c = cs[i]
+08:         while n < maxiter and abs(z) < 2:
+09:             z = z * z + c
+10:             n += 1
+11:             output[i] = n
+12:     return output
```

Rysunek 7.3. Kod C ukryty w wierszu kodu Python

Aby poprawić czas wykonywania funkcji, konieczne jest rozpoczęcie deklarowania typów obiektów, które są uwzględniane w pętlach wewnętrznych generujących duże obciążenie. Dzięki temu pętle te mogą tworzyć mniej dość kosztownych wywołań kierowanych do maszyny wirtualnej języka Python. W ten sposób oszczędza się czas.

Ogólnie rzecz biorąc, do wierszy kodu, które prawdopodobnie zajmują najwięcej czasu procesora, zaliczają się następujące:

- wiersze znajdujące się w intensywnych pętlach wewnętrznych,
- wiersze usuwające odwołania do elementów obiektów `list`, `array` lub `np.array`,
- wiersze wykonujące operacje matematyczne.



Jeśli nie wiesz, jakie wiersze są najczęściej wykonywane, wykorzystaj narzędzie do profilowania `line_profiler`, które omówiono w podrozdziale „Użycie narzędzia `line_profiler` do pomiarów dotyczących kolejnych wierszy kodu” z rozdziału 2. Dowiesz się, jakie wiersze są najczęściej wykonywane, a także które z nich powodują największe obciążenie wewnątrz maszyny wirtualnej języka Python. Dzięki temu uzyskasz wyraźny dowód na to, jakie wiersze wymagają uwagi w celu osiągnięcia najlepszego przyrostu szybkości.

## Dodawanie adnotacji typu

Na rysunku 7.2 pokazano, że prawie każdy wiersz funkcji jest wywoływany w maszynie wirtualnej języka Python. Wszystkie obliczenia numeryczne również są wywoływane w tej maszynie, ponieważ używane są obiekty języka Python wyższego poziomu. Konieczne jest przekształcenie tych obiektów w lokalne obiekty języka C, a następnie, po przeprowadzeniu kodowania numerycznego, przekształcenie wyniku z powrotem w obiekt języka Python.

W przykładzie 7.6 widoczny jest sposób dodawania typów podstawowych za pomocą składni słowa kluczowego `cdef`.

*Przykład 7.6. Dodawanie typów podstawowych języka C w celu rozpoczęcia przyspieszania działania skompilowanej funkcji. W tym celu używany jest w większym stopniu język C, a w mniejszym kod wykorzystujący maszynę wirtualną języka Python*

```
def calculate_z(int maxiter, zs, cs):
    """Obliczanie listy output za pomocą reguły aktualizacji zbioru Julii"""
    cdef unsigned int i, n
    cdef double complex z, c
    output = [0] * len(zs)
    for i in range(len(zs)):
        n = 0
        z = zs[i]
        c = cs[i]
        while n < maxiter and abs(z) < 2:
            z = z * z + c
            n += 1
        output[i] = n
    return output
```



Godne uwagi jest to, że takie typy będą zrozumiałe dla kompilatora Cython, lecz *nie* dla interpretera języka Python. Kompilator Cython używa tych typów do przekształcania kodu Python w obiekty języka C, które nie muszą być wywoływane w stosie języka Python. Oznacza to, że operacje są szybsze, ale towarzyszy temu utrata elastyczności i szybkości tworzenia kodu.

Dodawane są następujące typy:

- `int` dla liczby całkowitej ze znakiem,
- `unsigned int` dla liczby całkowitej, która może być tylko dodatnia,
- `double complex` dla liczb zespolonych podwójnej precyzji.

Słowo kluczowe `cdef` umożliwia zadeklarowanie zmiennych wewnątrz zawartości funkcji. Musi ono być deklarowane na początku funkcji, ponieważ jest to wymóg specyfikacji języka C.



Podczas dodawania adnotacji kompilatora Cython dodajesz kod inny niż kod Python do pliku `.pyx`. Oznacza to, że rezygnujesz z interaktywności tworzenia kodu Python w interpreterze. Z myślą o osobach zaznajomionych z pisaniem kodu w języku C poracamy do cyklu tworzenie kodu – kompilowanie – uruchamianie – debugowanie.

Możesz zastanawiać się, czy możliwe jest dodanie adnotacji typu do przekazywanych list. Choć używane jest słowo kluczowe `list`, w omawianym przykładzie nie ma to praktycznie żadnego znaczenia. Obiekty `list` nadal muszą być sprawdzane na poziomie interpretera języka Python w celu wyodrębnienia ich zawartości. Jest to bardzo wolna operacja.

Przypisywanie typów niektórym podstawowym obiektom odzwierciedlane jest w danych wyjściowych widocznych na rysunku 7.4. Co ważne, wiersze 11. i 12., czyli dwa z najczęściej wywoływanych wierszy kodu, zmieniły teraz kolor z żółtego na biały. Wskazuje to, że nie są one już wywoływane w maszynie wirtualnej języka Python. W porównaniu z poprzednim przykładem można spodziewać się znacznego wzrostu szybkości. Wiersz 10. jest wywoływany ponad 30 milionów razy, dlatego nadal warto się na nim koncentrować.

```
Generated by Cython 0.21.1

Raw output: cythonfn.c

+01: def calculate_z(int maxiter, zs, cs):
+02:     """Obliczanie listy output za pomocą reguły aktualizacji zbioru Julii"""
+03:     cdef unsigned int i, n
+04:     cdef double complex z, c
+05:     output = [0] * len(zs)
+06:     for i in range(len(zs)):
+07:         n = 0
+08:         z = zs[i]
+09:         c = cs[i]
+10:         while n < maxiter and abs(z) < 2:
+11:             z = z * z + c
+12:             n += 1
+13:         output[i] = n
+14:     return output
```

Rysunek 7.4. Pierwsze adnotacje typu

Po skompilowaniu zakończenie wykonywania tej wersji kodu zajmuje 4,3 sekundy. Po wprowadzeniu zaledwie kilku zmian w funkcji uzyskujemy szybkość dwukrotnie większą niż w przypadku oryginalnego kodu Python.

Godne uwagi jest to, że wzrost szybkości wynika z tego, że więcej często wykonywanych operacji kierowanych jest do poziomu kodu C (w tym przypadku są to aktualizacje do wartości zmiennych `z` i `n`). Oznacza to, że kompilator kodu C może optymalizować sposób przetwarzania przez funkcje niskiego poziomu bajtów, które reprezentują te zmienne, bez wywoływania funkcji w stosunkowo wolnej maszynie wirtualnej języka Python.

Na rysunku 7.4 widać, że pętla `while` nadal w pewnym stopniu generuje koszty (ma kolor żółty). Kosztowne wywołanie w maszynie wirtualnej języka Python dotyczy funkcji `abs` na potrzeby liczby zespolonej `z`. Kompilator Cython nie zapewnia wbudowanej funkcji `abs` dla liczb zespolonych. Zamiast niej można udostępnić własne lokalne rozszerzenie.

Jak wspomniano wcześniej w rozdziale, użycie funkcji `abs` dla liczby zespolonej uwzględnia obliczenie pierwiastka kwadratowego sumy kwadratów składowych rzeczywistych i urojonych. W teście pożądanym jest sprawdzenie, czy pierwiastek kwadratowy wyniku jest mniejszy niż 2. Zamiast wyznaczania pierwiastka kwadratowego można obliczyć kwadrat drugiej strony porównania. Oznacza to, że  $< 2$  zostanie przekształcone w  $< 4$ . Dzięki temu eliminuje się konieczność obliczania pierwiastka kwadratowego jako ostatniej części funkcji `abs`.

Rozpoczęto od postaci:

$$\sqrt{c.real^2 + c.imag^2} < \sqrt{4}$$

Operację uproszczono do następującej postaci:

$$c.real^2 + c.imag^2 < 4$$

Jeśli w poniższym kodzie zostałyby zachowane operacje `sqrt`, w dalszym ciągu byłby zauważalny wzrost szybkości wykonywania. Jednym z sekretów optymalizowania kodu jest sprawienie, aby realizował jak najmniej działań. Dzięki usunięciu stosunkowo kosztownej operacji po zastanowieniu się nad ostatecznym celem funkcji kompilator kodu C będzie mógł wykonać to, z czym sobie dobrze radzi, zamiast próbować „odgadnąć”, jakiego efektu końcowego oczekuje programista.

Tworzenie równoważnego, lecz bardziej wyspecjalizowanego kodu do rozwiązania tego samego problemu, jest określane mianem *redukowania mocy* (ang. *strength reduction*). Kosztem mniejszej elastyczności (i być może czytelności) zyskuje się krótszy czas wykonywania.

To matematyczne rozwinięcie prowadzi do przykładu 7.7, w którym dość kosztowna funkcja `abs` została zastąpiona uproszczonym wierszem rozszerzonych działań matematycznych.

*Przykład 7.7. Rozwijanie funkcji `abs` za pomocą kompilatora Cython*

```
def calculate_z(int maxiter, zs, cs):
    """Obliczanie listy output za pomocą reguły aktualizacji zbioru Julii"""
    cdef unsigned int i, n
    cdef double complex z, c
    output = [0] * len(zs)
    for i in range(len(zs)):
        n = 0
        z = zs[i]
        c = cs[i]
        while n < maxiter and (z.real * z.real + z.imag * z.imag) < 4:
            z = z * z + c
            n += 1
        output[i] = n
    return output
```

Tworzenie adnotacji dla kodu pozwala nieznacznie poprawić wydajność instrukcji `while` w wierszu 10. (rysunek 7.5). Obecnie instrukcja obejmuje mniej wywołań w wirtualnej maszynie języka Python. Choć skala wzrostu szybkości, jaki zostanie uzyskany, nie jest od razu oczywista, wiadomo, że wiersz ten jest wywoływany ponad 30 milionów razy. Oznacza to, że przewidywane jest odpowiednie zwiększenie wydajności.

Generated by Cython 0.21.1

Raw output: `cythonfn.c`

```
+01: def calculate_z(int maxiter, zs, cs):
+02:     """Obliczanie listy output za pomocą reguły aktualizacji zbioru Julii"""
+03:     cdef unsigned int i, n
+04:     cdef double complex z, c
+05:     output = [0] * len(zs)
+06:     for i in range(len(zs)):
+07:         n = 0
+08:         z = zs[i]
+09:         c = cs[i]
+10:         while n < maxiter and (z.real * z.real + z.imag * z.imag) < 4:
+11:             z = z * z + c
+12:             n += 1
+13:         output[i] = n
+14:     return output
```

Rysunek 7.5. Rozszerzone działania matematyczne pozwalające na ostateczną wygraną w procesie optymalizacji

Ta zmiana ma diametralne znaczenie. Przez zmniejszenie liczby wywołań w najbardziej wewnętrznej pętli znacząco skracany jest czas obliczeniowy funkcji. Czas wykonania nowej wersji kodu wynosi zaledwie 0,25 sekundy, co oznacza niesamowite 40-krotne przyspieszenie w porównaniu z oryginalną wersją kodu.



Kompilator Cython obsługuje kilka metod kompilowania do postaci kodu C. Niektóre z nich są prostsze od opisanej tutaj metody tworzenia pełnej adnotacji typu. Aby ułatwić sobie rozpoczęcie korzystania z kompilatora Cython, należy zaznajomić się z trybem czystego kodu Python, a ponadto przyjrzeć się narzędziu `pyximport`, które ułatwia zaprezentowanie tego kompilatora współpracownikom.

Aby dla omawianej porcji kodu uzyskać dodatkowy możliwy wzrost wydajności, możesz wyłączyć sprawdzanie ograniczeń dla każdego zastąpienia odwołania na liście. Celem sprawdzania ograniczeń jest zapewnienie, że program nie będzie korzystał z danych poza obrębem przydzielonej tablicy. W przypadku kodu C z łatwością można przypadkowo uzyskać dostęp do pamięci poza granicami tablicy, co spowoduje nieoczekiwane wyniki (i prawdopodobnie błąd segmentacji!).

Domyślnie kompilator Cython chroni programistę przed przypadkowym adresowaniem poza granicami listy. Choć taka ochrona wiąże się z niewielkim wykorzystaniem czasu procesorowego, występuje w zewnętrznej pętli funkcji. Z tego powodu sumarycznie nie powoduje znacznego wydłużenia czasu wykonywania. Zwykle bezpieczne jest wyłączenie sprawdzania ograniczeń, o ile nie przeprowadzasz własnych obliczeń związanych z adresowaniem tablicy. W tym przypadku konieczne będzie zadbanie o to, aby nie zostały przekroczone granice listy.

Kompilator Cython oferuje zestaw flag, które mogą być określane na różne sposoby. Najprostszy polega na dodaniu ich jako jednowierszowych komentarzy na początku pliku `.pyx`. Do zmiany tych ustawień możliwe jest też użycie dekoratora lub flagi czasu kompilowania. W celu wyłączenia sprawdzania granic dodajemy dyrektywę kompilatora Cython w obrębie komentarza na początku pliku `.pyx`.

```
#cython: boundscheck=False
def calculate_z(int maxiter, zs, cs):
```

Jak widać, wyłączenie sprawdzania ograniczeń spowoduje tylko nieznaczne skrócenie czasu, ponieważ ma to miejsce w pętli zewnętrznej, a nie wewnętrznej, co jest kosztowniejsze. W przypadku omawianego przykładu nie zapewni to żadnego skrócenia czasu.



Spróbuj wyłączyć sprawdzanie ograniczeń i przepełnienia, jeśli kod powiązany z procesorem znajduje się w pętli, która często zastępuje odwołania dla elementów.

## Shed Skin

*Shed Skin* (<http://code.google.com/p/shedskin/>) to eksperymentalny kompilator Python-C++, który współdziała z językiem Python w wersjach 2.4 – 2.7. Kompilator używa inferencji typów do automatycznego sprawdzenia programu Python w celu tworzenia adnotacji typów stosowanych dla każdej zmiennej. Taki kod z adnotacjami jest następnie przekształcany w kod C, aby można go było skompilować za pomocą standardowego kompilatora (np. g++). Automatyczna introspekcja to bardzo interesująca funkcja kompilatora Shed Skin. Użytkownik musi jedynie zapewnić przykład prezentujący sposób wywołania funkcji z wykorzystaniem właściwego rodzaju danych, a kompilator sam określi resztę.

Zaletą inferencji typów jest to, że programista nie musi jawnie określać typów. Aby tak było, analizator musi mieć możliwość zidentyfikowania typów dla każdej zmiennej w programie. W bieżącej wersji kompilatora tysiące wierszy kodu Python mogą być automatycznie przekształcane do postaci kodu C. Kompilator korzysta z narzędzia Boehma oczyszczającego pamięć, które umożliwia dynamiczne zarządzanie pamięcią. Narzędzie to jest używane także w przypadku kompilatorów Mono i GNU Compiler for Java. Wadą kompilatora Shed Skin jest to, że dla standardowych bibliotek stosuje zewnętrzne implementacje. Wszystko, co nie zostało zaimplementowane (dotyczy to również narzędzia numpy), nie będzie obsługiwane.

Projekt kompilatora Shed Skin zawiera ponad 75 przykładów, w tym wiele modułów matematycznych utworzonych w czystym kodzie Python, a nawet w pełni działający emulator Commodore 64. Każdy z przykładowych kodów działa znacznie szybciej po skompilowaniu za pomocą kompilatora Shed Skin (nawet w porównaniu z uruchomieniem w obrębie narzędzia CPython).

Kompilator Shed Skin może tworzyć odrębne programy wykonywalne, które nie zależą od używanej instalacji interpretera języka Python lub modułów rozszerzeń wykorzystywanych wraz z instrukcją `import` w zwykłym kodzie Python.

Skompilowane moduły zarządzają własną pamięcią. Oznacza to, że pamięć z procesu kodu Python jest kopiowana, a wyniki są z powrotem kopiowane — nie występuje żadne jawne współużytkowanie pamięci. W przypadku dużych bloków pamięci (np. dużej macierzy) koszt wykonywania operacji kopiowania może być znaczny. Przyjrzymy się temu na końcu tego podrozdziału.

Kompilator Shed Skin zapewnia podobny zestaw korzyści co kompilator PyPy (więcej informacji zamieszczono w podrozdziale „PyPy”). Oznacza to, że kompilator PyPy może być łatwiejszy w użyciu, ponieważ nie wymaga żadnych kroków kompilacji. Sposób automatycznego dodawania adnotacji typu przez kompilator Shed Skin może być interesujący dla niektórych użytkowników. Jeśli ponadto zamierzasz modyfikować wynikowy kod C, wygenerowany



kod C może być bardziej czytelny niż kod C utworzony przez kompilator Cython. Podejrzewamy, że kod z automatyczną inferencją typów będzie szczególnie interesujący dla innych twórców kompilatorów w społeczności.

## Tworzenie modułu rozszerzenia

W przedstawionym tutaj przykładzie zostanie zbudowany moduł rozszerzenia. Za pomocą instrukcji `import` można zaimportować wygenerowany moduł tak, jak to miało miejsce w przypadku przykładów dotyczących kompilatora Cython. Moduł ten może też zostać skompilowany w postaci odrębnego programu wykonywalnego.

W przykładzie 7.8 zamieszczono kod w osobnym module. Zawiera on zwykły kod Python, dla którego w żaden sposób nie są tworzone adnotacje typu. Zauważ również, że dodano test `__main__`, który powoduje, że moduł ten ma niezależną postać na potrzeby analizy typów. Kompilator Shed Skin może użyć tego bloku `__main__`, który zapewnia przykładowe argumenty, do identyfikacji typów przekazywanych do funkcji `calculate_z`, a także do określenia typów wykorzystywanych wewnątrz funkcji powiązanej z procesorem.

Przykład 7.8. Przenoszenie funkcji powiązanej z procesorem do osobnego modułu (jak w przypadku kompilatora Cython) w celu umożliwienia działania systemu automatycznej inferencji typów kompilatora Shed Skin

```
# shedskinfn.py
def calculate_z(maxiter, zs, cs):
    """Obliczanie listy output za pomocą reguły aktualizacji zbioru Julii"""
    output = [0] * len(zs)
    for i in range(len(zs)):
        n = 0
        z = zs[i]
        c = cs[i]
        while n < maxiter and abs(z) < 2:
            z = z * z + c
            n += 1
        output[i] = n
    return output
if __name__ == "__main__":
    # Tworzenie trywialnego przykładu za pomocą poprawnych typów w celu umożliwienia
    # wywołania funkcji przez inferencję typów, aby kompilator Shed Skin mógł analizować typy
    output = calculate_z(1, [0j], [0j])
```

Moduł ten można zaimportować w zwykły sposób (przykład 7.9) zarówno przed skompilowaniem go, jak i po kompilacji. Ponieważ kod nie jest modyfikowany (inaczej niż w przypadku kompilatora Cython), przed kompilacją możliwe jest wywołanie oryginalnego modułu Python. Jeśli kod nie zostanie skompilowany, nie uzyska się przyrostu szybkości, ale możliwe będzie przeprowadzenie debugowania w uproszczony sposób za pomocą zwykłych narzędzi powiązanych z językiem Python.

Przykład 7.9. Importowanie modułu zewnętrznego w celu umożliwienia kompilatorowi Shed Skin skompilowania tylko tego modułu

```
...
import shedskinfn
...
def calc_pure_python(desired_width, max_iterations):
    #...
    start_time = time.time()
```



```

output = shedskinfm.calculate_z(max_iterations, zs, cs)
end_time = time.time()
secs = end_time - start_time
print "Czas trwania:", secs, "s"
...

```

Jak zaprezentowano w przykładzie 7.10, możliwe jest sprawienie, by kompilator Shed Skin udostępnił dane wyjściowe z adnotacją związane z jego analizą. Umożliwia to polecenie `shedskin -ann shedskinfm.py`, które generuje plik `shedskinfm.ss.py`. W przypadku kompilowania modułu rozszerzenia konieczne jest jedynie zainicjowanie analizy za pomocą fikcyjnej funkcji `__main__`.

*Przykład 7.10. Sprawdzanie danych wyjściowych z adnotacją kompilatora Shed Skin w celu stwierdzenia, jakie typy zostały przez niego zidentyfikowane*

```

# shedskinfm.ss.py
def calculate_z(maxiter, zs, cs):
    # maxiter: [int],
    # zs: [list(complex)],
    # cs: [list(complex)]

    """Obliczanie listy output za pomocą reguły aktualizacji zbioru Julia"""
    output = [0] * len(zs)
    # [list(int)]
    for i in range(len(zs)):
        # [__iter(int)]
        n = 0
        # [int]
        z = zs[i]
        # [complex]
        c = cs[i]
        # [complex]
        while n < maxiter and abs(z) < 2:
            # [complex]
            z = z * z + c
            # [complex]
            n += 1
            # [int]
        output[i] = n
        # [int]
    return output
    # [list(int)]
if __name__ == "__main__":
    # []
    # Tworzenie trywialnego przykładu za pomocą poprawnych typów w celu umożliwienia
    # wywołania funkcji przez inferencję typów, aby kompilator Shed Skin mógł analizować typy
    output = calculate_z(1, [0j], [0j])
    # [list(int)]

```

Po przeanalizowaniu typów `__main__` wewnątrz funkcji `calculate_z` mogą być identyfikowane zmienne, takie jak `z` i `c`, na podstawie obiektów, z którymi prowadzą one interakcję.

Moduł jest kompilowany przy użyciu polecenia `shedskin --extmod shedskinfm.py`. Generowane są następujące pliki:

- `shedskinfm.hpp` (plik nagłówkowy C++),
- `shedskinfm.cpp` (plik źródłowy C++),
- `Makefile`.

Uruchomienie programu `make` powoduje wygenerowanie pliku `shedskinfm.so`. Instrukcja `import shedskinfm` pozwala użyć tego pliku w kodzie Python. Czas wykonywania skryptu `julia1.py` z wykorzystaniem pliku `shedskinfm.so` wynosi 0,4 sekundy. Jest to ogromna poprawa wydajności w porównaniu z wersją bez kompilacji, która wymagała bardzo niewielkiego nakładu pracy.

Tak jak w przypadku kompilatora Cython w przykładzie 7.7, możliwe jest również rozwinięcie funkcji `abs`. Po uruchomieniu tej wersji kodu (ze zmodyfikowanym tylko jednym wierszem funkcji `abs`) i użyciu kilku dodatkowych flag (`--nobounds --nowrap`) ostatecznie uzyskujemy czas wykonywania wynoszący 0,3 sekundy. Choć jest to czas trochę dłuższy (o 0,05 sekundy) niż w przypadku wersji z kompilatorem Cython, *nie było konieczne podawanie wszystkich informacji o typach*. Oznacza to, że eksperymentowanie z wykorzystaniem kompilatora Shed Skin jest bardzo łatwe. Kompilator PyPy uruchamia tę samą wersję kodu z podobną szybkością.



To, że w przypadku omawianego przykładu kompilatory Cython, PyPy i Shed Skin korzystają z podobnych środowisk wykonawczych, nie oznacza, że uzyskany wynik może zostać uogólniony. Aby w realizowanym projekcie osiągnąć najlepsze czasy wykonywania, trzeba sprawdzić różne narzędzia i przeprowadzić własne eksperymenty.

Kompilator Shed Skin umożliwia określenie dodatkowych flag dotyczących kompilacji, takich jak `-ffast-math` lub `-O3`. W dwóch krokach (w pierwszym gromadzone są statystyki dotyczące wykonywania, a w drugim wygenerowany kod jest optymalizowany na podstawie uzyskanych statystyk) można dodać optymalizację PGO (*Profile-Guided Optimization*) w celu podjęcia próby osiągnięcia dodatkowego wzrostu szybkości. Optymalizacja PGO nie spowodowała jednak przyspieszenia wykonywania kodu dla przykładu zbioru Julii. W praktyce optymalizacja ta często zapewnia niewielki rzeczywisty wzrost wydajności lub żaden.

Należy zauważyć, że domyślnie liczby całkowite są 32-bitowe. Jeśli wymagane są większe zakresy z 64-bitowymi liczbami całkowitymi, podaj flagę `--long`. Należy też unikać dzielenia małych obiektów (np. nowych krotek) w obrębie pętli wewnętrznych, ponieważ proces czyszczenia pamięci nie obsługuje ich tak efektywnie, jak można byłoby oczekiwać.

## Koszt związany z kopiami pamięci

W przykładzie kompilator Shed Skin kopiuje do swojego środowiska obiekty list języka Python, upraszczając dane do postaci podstawowych typów języka C. Kompilator przekształca następnie wynik funkcji języka C na końcu jej wykonywania z powrotem w obiekt list języka Python. Takie przekształcenia i kopiowania zajmują czas. Czy może to oznaczać brakujący czas wynoszący 0,05 sekundy, o którym wspomniano przy okazji poprzedniego wyniku?

Aby określić jedynie koszt związany z kopiowaniem danych do/z funkcji za pośrednictwem kompilatora Shed Skin, można zmodyfikować plik `shedskinfn.py` w celu usunięcia kodu odpowiedzialnego za realizowanie rzeczywistych operacji. Następujący wariant funkcji `calculate_z` to właśnie to, co jest potrzebne:

```
def calculate_z(maxiter, zs, cs):
    """Obliczanie listy output za pomocą reguły aktualizacji zbioru Julii"""
    output = [0] * len(zs)
    return output
```

W przypadku wykonywania skryptu `julia1.py` za pomocą tej funkcji szkieletowej czas wynosi w przybliżeniu 0,05 sekundy (oczywiście skrypt nie oblicza poprawnego wyniku!). Czas ten stanowi koszt kopiowania 2 milionów liczb zespolonych do funkcji `calculate_z` oraz ponownego kopiowania z niej miliona liczb całkowitych. Zasadniczo kompilatory Shed Skin i Cython generują ten sam kod maszynowy. Różnica w szybkości wykonywania wynika z tego, że kompilator Shed Skin działa w niezależnym obszarze pamięci, oraz z obciążenia związanego z koniecznością kopiowania danych. Z drugiej strony w przypadku kompilatora Shed Skin nie ma potrzeby tworzenia na początku adnotacji, co zapewnia dość znaczne oszczędności czasu.

# Cython i numpy

Obiekty listy (więcej informacji zamieszczono w rozdziale 3.) powodują obciążenie w przypadku każdej operacji zastępowania odwołania, ponieważ przywoływane przez nie obiekty mogą znajdować się w dowolnym miejscu w pamięci. Dla porównania, obiekty tablicy przechowują typy podstawowe w ciągłych blokach pamięci RAM, co pozwala na szybsze adresowanie.

Język Python oferuje moduł `array`, który zapewnia jednowymiarowe przechowywanie typów podstawowych (w tym liczb całkowitych, liczb zmiennoprzecinkowych i łańcuchów Unicode). Moduł `numpy.array` narzędzia `numpy` umożliwia wielowymiarowe przechowywanie oraz oferuje szerszą gamę typów podstawowych, w tym liczby zespolone.

W przypadku iterowania obiektu `array` w sposób możliwy do przewidzenia kompilator może zostać poinstruowany w celu uniknięcia żądania od interpretera języka Python, by obliczył odpowiedni adres. Zamiast tego interpreter może zająć się następnym elementem podstawowym w sekwencji, co polega na bezpośrednim przejściu do jego adresu pamięci. Ponieważ dane są rozmieszczone w ciągłym bloku, trywialnym zadaniem jest obliczenie za pomocą przesunięcia adresu następnego elementu kodu C. Dzięki temu nie ma potrzeby instruowania narzędzia `CPython`, aby obliczyło taki sam wynik, co wiązałoby się z użyciem wolnego wywołania w obrębie maszyny wirtualnej.

Należy zauważyć, że jeśli zostanie uruchomiona wersja kodu narzędzia `numpy` bez żadnych adnotacji kompilatora Cython (czyli kod po prostu zostanie wykonany jako zwykły skrypt Python), zajmie to około 71 sekund. Jest to zdecydowanie gorszy wynik niż dla wersji kodu ze zwykłym obiektem `list` języka Python, którego wykonanie zajęło około 11 sekund. Spowolnienie jest spowodowane obciążeniem wynikającym z zastępowania odwołań dla poszczególnych elementów list narzędzia `numpy`. Nie zostało przewidziane używanie tych list w ten sposób, nawet mimo tego, że dla początkujących programistów może się to wydać intuicyjną metodą obsługi operacji. Kompilowanie kodu eliminuje to obciążenie.

W odniesieniu do tego kompilator Cython oferuje dwie specjalne postaci składni. Starsze wersje kompilatora udostępniają specjalny typ dostępu dla tablic narzędzia `numpy`, a później za pośrednictwem interfejsu `memoryview` wprowadzono ogólny protokół interfejsu bufora. Zapewnia on ten sam niskopoziomowy dostęp do dowolnego obiektu, który implementuje interfejs bufora, uwzględniając tablice narzędzia `numpy` i języka Python.

Dodatkową korzyścią oferowaną przez interfejs bufora jest to, że umożliwia łatwe współużytkowanie bloków pamięci z innymi bibliotekami języka C bez potrzeby przekształcania ich z obiektów języka Python w inną postać.

Blok kodu z przykładu 7.11 przypomina trochę oryginalną implementację, z tym wyjątkiem, że zostały dodane adnotacje interfejsu `memoryview`. Drugi argument funkcji to `double complex[:]` `zs`. Oznacza to, że używany jest obiekt liczb zespolonych o podwójnej precyzji, który korzysta z protokołu bufora (określony za pomocą znaków `[]`) zawierającego jednowymiarowy blok danych (określony przy użyciu dwukropka `:`).

Przykład 7.11. Wersja kodu z adnotacjami narzędzia *numpy* dla funkcji obliczającej zbiór Julii

```
# cython_np.pyx
import numpy as np
cimport numpy as np
def calculate_z(int maxiter, double complex[:] zs, double complex[:] cs):
    """Obliczanie listy output za pomocą reguły aktualizacji zbioru Julii"""
    cdef unsigned int i, n
    cdef double complex z, c
    cdef int[:] output = np.empty(len(zs), dtype=np.int32)
    for i in range(len(zs)):
        n = 0
        z = zs[i]
        c = cs[i]
        while n < maxiter and (z.real * z.real + z.imag * z.imag) < 4:
            z = z * z + c
            n += 1
        output[i] = n
    return output
```

Oprócz podawania argumentów wejściowych przy użyciu składni adnotacji bufora tworzone są też adnotacje dla zmiennej `output` przez przypisanie jej obiektu tablicy jednowymiarowej `array` narzędzia `numpy` za pośrednictwem funkcji `empty`. Wywołanie tej funkcji spowoduje przydzielenie bloku pamięci, ale nie zainicjuje pamięci przy użyciu rozsądnych wartości, dlatego może ona zawierać cokolwiek. Ponieważ zawartość takiej tablicy zostanie nadpisana w pętli wewnętrznej, nie będzie konieczne ponowne przypisywanie tablicy przy użyciu wartości domyślnej. Jest to trochę szybsze niż przydzielanie i ustawianie zawartości tablicy za pomocą wartości domyślnej.

Używając szybszej i bardziej jawnej wersji matematycznej, rozwinięto również wywołanie funkcji `abs`. Czas działania tej wersji wynosi 0,23 sekundy, czyli jest to wynik nieznacznie lepszy niż w przypadku oryginalnej wersji kodu używającego kompilatora `Cython`, która bazuje na czystym kodzie `Python` z przykładu 7.7 zbioru `Julii`. Czysta wersja kodu powoduje obciążenie każdorazowo przy zastępowaniu odwołania dla obiektu `complex` kodu `Python`, ale operacje te występują w pętli zewnętrznej, dlatego nie mają dużego udziału w czasie wykonywania. Po pętli zewnętrznej tworzone są macierzyste wersje zmiennych, które działają z „szybkością kodu C”. Pętla wewnętrzna, zarówno w przypadku przykładowego kodu narzędzia `numpy`, jak i wcześniejszego przykładu czystego kodu `Python`, realizuje te same działania dla tych samych danych. Oznacza to, że różnica w czasie wykonywania wynika z operacji zastępowania odwołań w pętli zewnętrznej oraz tworzenia tablic `output`.

## Przetwarzanie równoległe rozwiązania na jednym komputerze z wykorzystaniem interfejsu `OpenMP`

W ramach ostatniego kroku rozwijania omawianej wersji kodu przyjrzymy się użyciu rozszerzeń języka `C++` interfejsu `OpenMP` do zastosowania przetwarzania równoległego dla trudnego, ale umożliwiającego takie rozwiązanie problemu. Jeśli problem, który rozpatrujesz, jest podobny, możesz szybko skorzystać z wielu rdzeni obecnych w komputerze.

`OpenMP` (*Open Multi-Processing*) to dobrze zdefiniowany interfejs API dla wielu platform, który obsługuje wykonywanie równoległe i współużytkowanie pamięci dla kodu utworzonego przy użyciu języków `C`, `C++` i `Fortran`. Interfejs ten wbudowany jest w większość nowoczesnych kompilatorów kodu `C`. Jeśli kod `C` zostanie właściwie napisany, przetwarzanie równoległe występuje na poziomie kompilatora. Oznacza to stosunkowo niewielki nakład pracy dla programisty, który korzysta z kompilatora `Cython`.

W przypadku tego kompilatora interfejs OpenMP może zostać dodany za pomocą operatora *prange* (*parallel range*) i przez dodanie do skryptu *setup.py* dyrektywy kompilatora *-fopenmp*. Działania w obrębie pętli tego operatora mogą być wykonywane równolegle, ponieważ wyłączana jest blokada GIL (*Global Interpreter Lock*).

Przykład 7.12 prezentuje zmodyfikowaną wersję kodu z obsługą operatora *prange*. Instrukcja *with nogil*: określa blok, w którym wyłączana jest blokada GIL. Wewnątrz tego bloku operator *prange* umożliwia pętli *for* przetwarzania równoległego interfejsu OpenMP niezależne obliczenie każdej wartości zmiennej *i*.

*Przykład 7.12. Dodawanie operatora prange w celu zastosowania przetwarzania równoległego za pomocą interfejsu OpenMP*

```
# cython_np.pyx
from cython.parallel import prange
import numpy as np
cimport numpy as np
def calculate_z(int maxiter, double complex[:] zs, double complex[:] cs):
    """Obliczanie listy output za pomocą reguły aktualizacji zbioru Julii"""
    cdef unsigned int i, length
    cdef double complex z, c
    cdef int[:] output = np.empty(len(zs), dtype=np.int32)
    length = len(zs)
    with nogil:
        for i in prange(length, schedule="guided"):
            z = zs[i]
            c = cs[i]
            output[i] = 0
            while output[i] < maxiter and (z.real * z.real + z.imag * z.imag) < 4:
                z = z * z + c
                output[i] += 1
    return output
```



Podczas wyłączania blokady GIL *nie* można przetwarzać zwykłych obiektów języka Python (*np. list*). Konieczne jest przetwarzanie wyłącznie obiektów podstawowych i obiektów, które obsługują interfejs *memoryview*. W przypadku przetwarzania równoległego zwykłych obiektów języka Python wymagane byłoby rozwiązanie problemów towarzyszących zarządzaniu pamięcią, których blokada GIL celowo unika. Kompilator Cython nie zapobiega modyfikowaniu obiektów języka Python. Jeśli sam to zrobisz, spowoduje to tylko problemy i zamieszanie!

Aby skompilować plik *cython\_np.pyx*, konieczne jest zmodyfikowanie skryptu *setup.py* w sposób pokazany w przykładzie 7.13. Po modyfikacji skrypt instruuje kompilator kodu C o użyciu flagi *-fopenmp* jako argumentu podczas kompilacji w celu włączenia interfejsu OpenMP i połączenia z jego bibliotekami.

*Przykład 7.13. Dodawanie do skryptu setup.py flag kompilatora i programu konsolidującego interfejsu OpenMP dla kompilatora Cython*

```
#setup.py
from distutils.core import setup
from distutils.extension import Extension
from Cython.Distutils import build_ext
setup(
    cmdclass = {'build_ext': build_ext},
    ext_modules = [Extension("calculate",
                            ["cython_np.pyx"],
                            extra_compile_args=['-fopenmp'],
                            extra_link_args=['-fopenmp'])]
)
```

Operator `prange` kompilatora Cython umożliwia wybranie różnych metod szeregowania. W przypadku opcji `static` obciążenie jest równomiernie rozkładane między dostępne procesory. Część obliczeń wymaga więcej czasu, a część nie. Jeśli kompilator Cython zostanie poinformowany, aby równomiernie szeregować porcje zadań między procesorami przy użyciu opcji `static`, wyniki dla części obliczeń zostaną uzyskane szybciej niż dla innych. Szybsze wątki przejdą następnie w stan bezczynności.

Dzięki opcjom szeregowania `dynamic` i `guided` można zmniejszyć skalę tego problemu przez dynamiczne przydzielanie zadań w mniejszych porcjach podczas wykonywania kodu. Dzięki temu w przypadku zmiennego czasu obliczeń obciążenie jest równomiernie rozkładane między procesorami. Właściwy wybór dla utworzonego kodu będzie zmieniał się w zależności od natury obciążenia.

Zastosowanie interfejsu OpenMP i opcji `schedule="guided"` pozwala skrócić czas wykonywania w przybliżeniu do 0,07 sekundy. Szeregowanie `guided` spowoduje dynamiczne przydzielanie zadań, dzięki czemu mniej wątków będzie oczekiwać na nowe zadania.

Używając instrukcji `#cython: boundscheck=False`, można też wyłączyć dla omawianego przykładu sprawdzanie ograniczeń, ale nie spowodowałyby to skrócenia czasu wykonywania.

## Numba

Narzędzie *Numba* (<http://numba.pydata.org/>) firmy Continuum Analytics to kompilator JIT specjalizujący się w kodzie narzędzia `numpy`, który dokonuje kompilacji tego kodu w czasie wykonywania za pośrednictwem kompilatora LLVM (a *nie*, tak jak we wcześniej prezentowanych przykładach, za pomocą kompilatora `g++` lub `gcc`). Numba nie wymaga kroku prekompilacji, dlatego po uruchomieniu dla nowego kodu kompiluje każdą funkcję z adnotacją, która jest wymagana przez używany sprzęt. Zaletą jest to, że kompilatorowi udostępniany jest dekorator, który informuje go o tym, jakimi funkcjami ma się zająć, po czym Numba zaczyna realizować swoje zadania. Kompilator Numba przeznaczony jest do stosowania dla każdego standardowego kodu narzędzia `numpy`.

Numba to krócej istniejący projekt (w książce użyto wersji 0.13), a związany z nim interfejs API może się nieznacznie zmieniać z każdą wersją. Z tego powodu na chwilę obecną należy traktować go jako bardziej przydatny w środowisku badawczym. Jeśli korzystasz z tablic narzędzia `numpy` i kodu bez wektoryzacji, który dokonuje iteracji dla wielu elementów, kompilator Numba powinien umożliwić Ci uzyskanie szybkiego efektu optymalizacji bez większego nakładu pracy.

Mankamentem związanym z użyciem kompilatora Numba jest łańcuch narzędzi. Korzysta on z kompilatora LLVM, a ponadto ma wiele zależności. Zalecamy zastosowanie dystrybucji Continuum Anaconda, ponieważ zapewnia wszystkie składniki. W przeciwnym razie instalowanie kompilatora Numba w nowym środowisku może być bardzo czasochłonnym zadaniem.

Przykład 7.14 prezentuje dodanie dekoratora `@jit` do podstawowej funkcji zbioru `Julii`. Nie jest wymagane nic więcej. To, że kompilator `numba` został zaimportowany, oznacza, że mechanizmy kompilatora LLVM zostaną uruchomione w czasie wykonywania w celu skompilowania tej funkcji w tle.

#### Przykład 7.14. Zastosowanie dekoratora @jit dla funkcji

```
from numba import jit
...
@jit()
def calculate_z_serial_purepython(maxiter, zs, cs, output):
```

Po usunięciu dekoratora @jit będzie to jedynie wersja kodu narzędzia numpy z demonstracją zbioru Julii obsługiwana przez interpreter języka Python 2.7. Wykonanie takiego kodu zajmie 71 sekund. Dodanie tego dekoratora powoduje skrócenie czasu wykonywania do 0,3 sekundy. Jest to czas bardzo zbliżony do wyniku osiągniętego w przypadku kompilatora Cython, lecz bez całego nakładu pracy związanego z tworzeniem adnotacji.

Jeśli ta sama funkcja zostanie uruchomiona drugi raz w tej samej sesji interpretera języka Python, zadziała jeszcze szybciej. Nie ma potrzeby kompilowania funkcji docelowej w drugim przejściu, jeśli jednakowe są typy argumentów. W efekcie ogólny czas wykonywania jest krótszy. W przypadku drugiego uruchomienia wynik kompilatora Numba odpowiada wcześniej uzyskanemu wynikowi zastosowania kompilatora Cython z narzędziem numpy (a zatem przy znikomym nakładzie pracy kompilator Numba okazał się równie szybki jak Cython!). Kompilator PyPy ma takie same wymagania związane z uruchamianiem.

W przypadku debugowania za pomocą kompilatora Numba warto zauważyć, że można go poinstruować w celu pokazania typu zmiennej, którą się zajmuje w obrębie skompilowanej funkcji. W przykładzie 7.15 widać, że zmienna zs jest rozpoznawana przez kompilator JIT jako tablica liczb zespolonych.

#### Przykład 7.15. Debugowanie identyfikowanych typów

```
print("Zmienna zs ma typ:", numba.typeof(zs))
      array(complex128, 1d, C)
```

Kompilator Numba obsługuje też inne formy introspekcji, takie jak `inspect_types`, która umożliwia przegląd skompilowanego kodu w celu stwierdzenia, gdzie zostały zidentyfikowane informacje o typach. W przypadku braku typów możliwe jest doprecyzowanie, jak wyrażono funkcję, aby ułatwić kompilatorowi Numba określenie większej liczby możliwości inferencji typów.

Platna wersja kompilatora Numba, czyli *NumbaPro* (<http://docs.continuum.io/numbapro/>), oferuje eksperymentalną obsługę operatora przetwarzania równoległego `prange` z wykorzystaniem interfejsu OpenMP. Dostępna jest również eksperymentalna obsługa układów GPU. Projekt ten ma na celu uproszczenie przekształcania wolniejszego kodu Python z pętlami bazującego na narzędziu numpy w bardzo szybki kod, który może być wykonywany w procesorze lub układzie GPU. Kompilator NumbaPro jest wart uwagi.

## Pythran

*Pythran* (<http://pythonhosted.org/pythran/>) to kompilator Python-C++ przeznaczony dla podzbioru instrukcji języka Python, który oferuje częściową obsługę narzędzia numpy. Kompilator ten działa trochę podobnie do kompilatorów Numba i Cython. Po utworzeniu przez programistę adnotacji argumentów funkcji kompilator Pythran zajmuje się dalej dodatkowymi adnotacjami typu i specjalizacją kodu. Wykorzystuje możliwości związane z wektoryzacją i przetwarzaniem równoległym opartym na interfejsie OpenMP. Działa wyłącznie w przypadku języka Python 2.7.



Bardzo interesującą funkcją kompilatora Pythran jest to, że próbuje automatycznie wykryć możliwości przetwarzania równoległego (np. w sytuacji, gdy używasz instrukcji `map`) i przekształcić kod w kod przetwarzania równoległego bez konieczności wykonywania przez programistę dodatkowych działań. Możliwe jest też określenie przy użyciu dyrektyw `pragma omp` sekcji przetwarzania równoległego. Pod tym względem sposób działania kompilatora Pythran bardzo przypomina obsługę interfejsu OpenMP przez kompilator Cython.

W tle kompilator Pythran pobiera zarówno zwykły kod Python, jak i kod narzędzia `numpy`, a następnie próbuje agresywnie kompilować je do postaci bardzo szybkiego kodu C++, który zapewnia wyniki jeszcze lepsze od uzyskanych dla kompilatora Cython. Należy zauważyć, że projekt ten jest stosunkowo nowy i mogą w nim występować błędy. Godne uwagi jest także to, że zespół programistów jest bardzo przyjaźnie nastawiony i zwykle usuwa zgłoszone błędy w ciągu kilku godzin.

Ponownie przyjrzyj się równaniu dyfuzji z przykładu 6.9. Część obliczeniową funkcji wyodrębniono do osobnego modułu, aby mogła zostać skompilowana do postaci biblioteki binarnej. Przydatną funkcją kompilatora Pythran jest to, że przy użyciu tego kompilatora *nie jest tworzony kod niezgodny z językiem Python*. Przypomnij sobie, że w przypadku kompilatora Cython konieczne było tworzenie plików `.pyx` z dołączonym kodem Python, który nie mógł być bezpośrednio uruchomiony przez interpreter języka Python. W przypadku kompilatora Pythran dodawane są jednowierszowe komentarze, które mogą zostać przez niego wykryte. Oznacza to, że jeśli zostanie usunięty generowany moduł kompilowany `.so`, można po prostu uruchomić kod przy użyciu interpretera języka Python. Jest to znakomita możliwość w odniesieniu do debugowania.

W przykładzie 7.16 zaprezentowano równanie przewodnictwa cieplnego. Funkcja `evolve` zawiera jednowierszowy komentarz, który dołącza dla niej informacje o typach (ponieważ jest to komentarz, uruchomienie kodu bez kompilatora Pythran sprawi, że interpreter języka Python po prostu go zignoruje). Po załadowaniu kompilator Pythran wykryje ten komentarz i dokona propagacji informacji o typach (bardzo podobnie jak w przypadku narzędzia `Shed Skin`) w każdej powiązanej funkcji.

*Przykład 7.16. Dodawanie jednowierszowego komentarza w celu dołączenia punktu wejścia do funkcji `evolve()`*

```
import numpy as np
def laplacian(grid):
    return np.roll(grid, +1, 0) +
           np.roll(grid, -1, 0) +
           np.roll(grid, +1, 1) +
           np.roll(grid, -1, 1) - 4 * grid
#pythran export evolve(float64[[[.float)
def evolve(grid, dt, D=1):
    return grid + dt * D * laplacian(grid)
```

Moduł ten można skompilować za pomocą polecenia `pythran diffusion_numpy.py`, które zwróci plik `diffusion_numpy.so`. Z poziomu funkcji testowej można zaimportować ten nowy moduł i wywołać funkcję `evolve`. Na laptopie jednego z autorów *bez* zainstalowanego kompilatora Pythran czas wykonywania tej funkcji dla siatki 8192×8192 wyniósł 3,8 sekundy. W przypadku kompilatora Pythran czas zmniejszył się do 1,5 sekundy. Oczywiście jeśli kompilator Pythran obsługuje wymagane funkcje, może zapewnić naprawdę imponujące wzrosty wydajności przy bardzo niewielkim nakładzie pracy.



Przyczyną przyspieszenia jest to, że kompilator Pythran używa własnej wersji funkcji `roll`, która cechuje się mniejszą funkcjonalnością. Oznacza to, że przeprowadza kompilację do postaci mniej złożonego kodu, który może działać szybciej. Ponadto kod ten jest mniej elastyczny niż kod narzędzia `numpy` (twórcy kompilatora Pythran zwracają uwagę na to, że implementuje on tylko niektóre elementy narzędzia `numpy`). Pod względem wyników Pythran może jednak prześcignąć inne wcześniej omówione narzędzia.

Zastosujmy teraz tę samą metodę dla przykładu rozszerzonych operacji matematycznych w przypadku zbioru Julii. Samo dodanie jednowierszowej adnotacji do funkcji `calculate_z` powoduje skrócenie czasu wykonywania do 0,29 sekundy, czyli wyniku trochę gorszego niż w przypadku wyniku kompilatora Cython. Dodanie jednowierszowej deklaracji interfejsu OpenMP na początku pętli zewnętrznej powoduje skrócenie czasu wykonywania do 0,1 sekundy. Czas ten nie odbiega zbyt od najlepszego wyniku uzyskanego dla interfejsu OpenMP kompilatora Cython. Kod z adnotacją został zaprezentowany w przykładzie 7.17.

*Przykład 7.17. Dodawanie adnotacji do funkcji `calculate_z` dla kompilatora Pythran z obsługą interfejsu OpenMP*

```
#pythran export calculate_z(int, complex[], complex[], int[])
def calculate_z(maxiter, zs, cs, output):
    #omp parallel for schedule(guided)
    for i in range(len(zs)):
```

Przedstawione dotychczas technologie uwzględniają użycie kompilatora, który towarzyszy zwykłemu interpreterowi CPython. Przyjrzymy się teraz narzędziu PyPy, które oferuje całkowicie nowy interpreter.

## PyPy

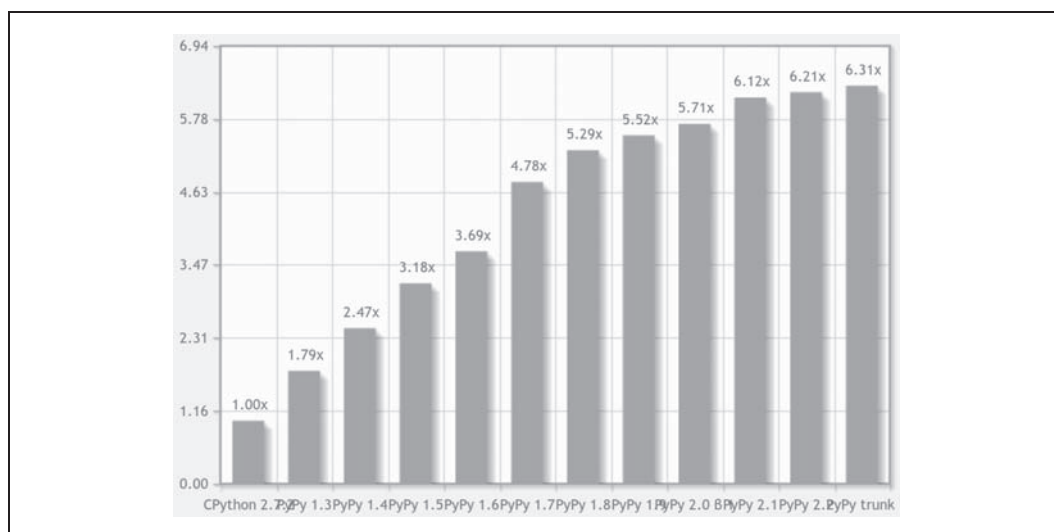
PyPy (<http://pypy.org/>) to alternatywna implementacja języka Python, która obejmuje śledzący kompilator JIT. Implementacja jest zgodna z językiem Python 2.7. Dostępna jest też eksperymentalna wersja dla języka Python 3.2.

Docelowo narzędzie PyPy zastępuje narzędzie CPython, oferując wszystkie wbudowane moduły. Projekt składa się z łańcucha narzędziowego RPython Translation Toolchain, który służy do budowania interpretera PyPy (i może zostać wykorzystany do tworzenia innych interpreterów). Kompilator JIT w interpreterze PyPy jest bardzo wydajny. Odpowiednie przyspieszenia można zauważyć przy niewielkim lub żadnym nakładzie pracy programisty. W podrozdziale „Interpreter PyPy zapewniający powodzenie systemów przetwarzania danych i systemów internetowych” z rozdziału 12. opisano historię dużego wdrożenia zakończonego sukcesem, które bazowało na interpreterze PyPy.

Interpreter PyPy uruchamia bez żadnych modyfikacji prezentację zbioru Julii bazującą na czystym kodzie Python. W przypadku narzędzi CPython i PyPy czas wykonywania tego kodu wynosi odpowiednio 11 sekund i 0,3 sekundy. Oznacza to, że interpreter PyPy osiąga wynik bardzo zbliżony do wyniku uzyskanego dla przykładowego kodu, dla którego zastosowano kompilator Cython (przykład 7.7). Nie jest z tym związany *zupełnie żaden nakład pracy*, co naprawdę robi wrażenie! Jak zaobserwowano przy okazji omawiania kompilatora Numba, jeśli obliczenia są przeprowadzane ponownie *w tej samej sesji*, drugie i kolejne uruchomienia są szybsze od pierwszego, ponieważ w ich przypadku kompilacja została już wykonana.

Interesujące jest to, że interpreter PyPy obsługuje wszystkie wbudowane moduły. Oznacza to, że moduł multiprocessing działa tak jak w przypadku narzędzia CPython. Jeśli zajmujesz się problemem wykorzystującym moduły z dołączonymi bibliotekami, który może być przetwarzany równoległe za pomocą modułu multiprocessing, oczekuj, że dostępne będą wszystkie przyrosty szybkości, jakich możesz się spodziewać.

Szybkość interpretera PyPy zwiększała się z czasem. Wykres na rysunku 7.6 uzyskany z serwisu [speed.pypy.org](http://speed.pypy.org) pozwala zorientować się w dojrzałości interpretera. Pokazane testy szybkości reprezentują szeroki zestaw przypadków użycia, a nie tylko operacje matematyczne. Oczywiście jest to, że interpreter PyPy oferuje większą wydajność niż narzędzie CPython.



Rysunek 7.6. Każda nowa wersja interpretera PyPy oferuje zwiększenie szybkości

## Różnice związane z czyszczeniem pamięci

Interpreter PyPy korzysta z procesu czyszczenia pamięci innego typu niż narzędzie CPython. Może to spowodować w kodzie pewne nieoczywiste zmiany w działaniu. Narzędzie CPython używa zliczenia odwołań, interpreter PyPy natomiast korzysta ze zmodyfikowanej metody zaznaczania i usuwania, która może znacznie później oczyścić nieużywany obiekt. Oba warianty są poprawnymi implementacjami specyfikacji języka Python. Trzeba tylko być świadomym tego, że niektóre modyfikacje kodu mogą być niezbędne podczas czyszczenia.

Niektóre metody tworzenia kodu omawiane w odniesieniu do narzędzia CPython zależą do działania licznika odwołań. Dotyczy to zwłaszcza opróżniania plików bez ich jawnego zamknięcia, gdy wykonywane są dla nich operacje otwierania i zapisywania. W przypadku interpretera PyPy ten sam kod zostanie uruchomiony, ale aktualizacje pliku mogą zostać w późniejszym czasie umieszczone na dysku przy następnym uruchomieniu procesu czyszczenia pamięci. Alternatywną formą, która sprawdza się zarówno dla interpretera PyPy, jak i interpretera języka Python, jest użycie menedżera kontekstu, korzystającego z instrukcji `with` do otwierania i automatycznego zamykania plików. Na stronie *Differences between PyPy and CPython* (różnice między interpreterem PyPy i narzędziem CPython) witryny internetowej interpretera PyPy podano odpowiednie szczegóły ([http://pypy.readthedocs.org/en/latest/cpython\\_differences.html](http://pypy.readthedocs.org/en/latest/cpython_differences.html)).

## Uruchamianie interpretera PyPy i instalowanie modułów

Jeśli nigdy nie uruchamiałeś alternatywnego interpretera języka Python, powinno Ci pomóc zaznajomienie się z krótkim przykładem. Zakładając, że pobrałeś i rozpakowałeś interpreter PyPy, zobaczysz strukturę folderów zawierającą katalog *bin*. W celu uruchomienia interpretera PyPy użyj polecenia z przykładu 7.18.

*Przykład 7.18. Uruchamianie interpretera PyPy w celu stwierdzenia, że implementuje język Python 2.7.3*

```
$ ./bin/pypy
Python 2.7.3 (84efb3ba05f1, Feb 18 2014, 23:00:21)
[PyPy 2.3.0-alpha0 with GCC 4.6.3] on linux2
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
And now for something completely different: ``<arigato> (not thread-safe, but
well, nothing is)''
```

Zauważ, że interpreter PyPy 2.3 działa jako interpreter języka Python 2.7.3. Konieczne jest teraz skonfigurowanie narzędzia pip. Pożądane będzie zainstalowanie narzędzia ipython (zwróć uwagę, że narzędzie IPython jest uruchamiane z tą samą instalacją interpretera języka Python 2.7.3, o której wcześniej wspomniano). Kroki przedstawione w przykładzie 7.19 są takie same jak te, które zostałyby wykonane w przypadku narzędzia CPython, gdyby zainstalowano narzędzie pip bez korzystania z istniejącej dystrybucji lub menedżera pakietów.

*Przykład 7.19. Instalowanie narzędzia pip dla interpretera PyPy w celu zainstalowania modułów zewnętrznych, takich jak IPython*

```
$ mkdir sources # tworzenie lokalnego katalogu pobierania
$ cd sources
# pobieranie dystrybucji i narzędzia pip
$ curl -O http://python-distribute.org/distribute_setup.py
$ curl -O https://raw.github.com/pypa/pip/master/contrib/get-pip.py
# uruchamianie za pomocą polecenia pypy plików instalacyjnych dla pobranych plików
$ ../bin/pypy ./distribute_setup.py
...
$ ../bin/pypy get-pip.py
...
$ ../bin/pip install ipython
...
$ ../bin/ipython
Python 2.7.3 (84efb3ba05f1, Feb 18 2014, 23:00:21)
Type "copyright", "credits" or "license" for more information.
IPython 2.0.0--An enhanced Interactive Python.
?      -> Introduction and overview of IPython's features.
%quickref -> Quick reference.
help    -> Python's own help system.
object? -> Details about 'object', use 'object??' for extra details.
```

Zauważ, że interpreter PyPy *nie* obsługuje projektów takich jak narzędzie numpy w przydatny sposób (istnieje warstwa pomostowa udostępniana przez narzędzie *cpyext* (<https://bitbucket.org/pypy/compatibility/wiki/c-api>), ale jest ono zbyt wolne, aby mogło okazać się wartościowe w przypadku narzędzia numpy). Z tego powodu nie należy oczekiwać dużego wsparcia narzędzia numpy ze strony interpretera PyPy. Oferuje on eksperymentalny port narzędzia numpy o nazwie *numppypy* (instrukcje instalacji są dostępne na *blogu jednego z autorów książki* <http://ianozsvald.com/2014/01/14/installing-the-numpy-module-in-pypy/>), który jednak nie zapewnia na razie żadnych godnych uwagi wzrostów szybkości<sup>1</sup>. [BS1]

<sup>1</sup> Może się to zmienić do końca roku 2014 (więcej informacji pod adresem <http://bit.ly/numppypy>).

Jeśli wymagasz innych pakietów, wszystko, co ma postać czystego kodu Python, *prawdopodobnie* zostanie zainstalowane, a to, co bazuje na bibliotekach rozszerzeń języka C, *raczej* nie będzie działać w przydatny sposób. Interpreter PyPy nie zawiera procesu czyszczącego pamięć ze zliczaniem odwołań. Wszystko, co zostanie skompilowane dla narzędzia CPython, będzie korzystać z wywołań biblioteki, które obsługują proces czyszczący pamięć narzędzia CPython. Interpreter PyPy zapewnia obejście tego problemu, ale wiąże się ono ze znacznym dodatkowym obciążeniem. W praktyce podejmowanie próby wymuszania współpracy starszych bibliotek rozszerzeń bezpośrednio z interpreterem PyPy nie ma żadnej wartości. W przypadku tego interpretera należy w miarę możliwości spróbować usunąć wszelki kod rozszerzenia C (taki kod może istnieć tylko w celu przyspieszenia kodu Python, za co obecnie ma być odpowiedzialny interpreter PyPy). Na stronie wiki dla interpretera PyPy utrzymywana jest *lista zgodnych modułów* (<https://bitbucket.org/pypy/compatibility/wiki/Home>).

Inną wadą interpretera PyPy jest to, że może zużywać wiele pamięci RAM. W tym zakresie każda kolejna wersja interpretera jest lepsza, ale w praktyce może on używać więcej pamięci RAM niż narzędzie CPython. Ponieważ jednak pamięć RAM jest dość tania, sensowne jest podjęcie próby poświęcenia jej dla zwiększonej wydajności. Niektórzy użytkownicy zgłosili również *mniejsze* zużycie pamięci RAM podczas korzystania z interpretera PyPy. Jak zawsze, jeśli jest to ważna kwestia, przeprowadź eksperyment przy użyciu reprezentatywnych danych.

Choć interpreter PyPy jest powiązany z blokadą GIL (*Global Interpreter Lock*), zespół programistów realizuje projekt o nazwie STM (*Software Transactional Memory*), który ma na celu podjęcie próby usunięcia wymogu stosowania blokady GIL. Projekt STM przypomina trochę transakcje bazy danych. Jest to mechanizm kontroli współbieżności stosowany dla operacji dostępu do pamięci. Mechanizm ten może wycofać zmiany, jeśli w tym samym obszarze pamięci wystąpią operacje powodujące konflikt. Celem integracji projektu STM jest umożliwienie systemom o wysokim stopniu współbieżności dysponowania pewną formą kontroli współbieżności. Będzie się to wiązać z utratą części efektywności w przypadku operacji, ale w zamian poprawi się wydajność programistów, którzy nie będą zmuszeni do zajmowania się wszystkimi aspektami kontroli jednoczesnego dostępu.

Na potrzeby profilowania polecane narzędzia to *jitviewer* (<https://bitbucket.org/pypy/jitviewer>) i *logparser* (<http://morepypy.blogspot.co.uk/2009/11/hi-all-this-week-i-worked-on-improving.html>).

## Kiedy stosować poszczególne technologie?

Jeśli realizujesz projekt o charakterze numerycznym, użycie każdej z opisanych technologii może okazać się przydatne. W tabeli 7.1 podsumowano główne opcje.

Tabela 7.1. Podsumowanie opcji kompilatorów

	Cython	Shed Skin	Numba	Pythran	PyPy
Dojrzałość	T	T	-	-	T
Rozpowszechnienie	T	-	-	-	-
Obsługa narzędzia numpy	T	-	T	T	-
Zmiany w kodzie niepowodujące rozdzielania	-	T	T	T	T
Wymóg znajomości języka C	T	-	-	-	-
Obsługa interfejsu OpenMP	T	-	T	T	T

Jeśli problem mieści się w ograniczonym zakresie obsługiwanych funkcji, kompilator Pythran oferuje prawdopodobnie największe przyrosty szybkości w przypadku problemów rozwiązywanych za pomocą narzędzia `numpy` przy najmniejszym nakładzie pracy. Kompilator ten zapewnia też kilka prostych w użyciu opcji przetwarzania równoległego interfejsu OpenMP. Ponadto jest stosunkowo nowym projektem.

Kompilator Numba może oferować szybkie przyrosty szybkości przy niewielkim nakładzie pracy, ale ma zbyt wiele ograniczeń, które mogą sprawić, że nie będzie dobrze działać dla napisanego kodu. Kompilator ten także jest stosunkowo nowym projektem.

Kompilator Cython oferuje prawdopodobnie najlepsze wyniki w przypadku najszerszej grupy problemów, ale wymaga większego nakładu pracy, a ponadto ponieważ korzysta z kombinacji kodu Python i adnotacji kodu C, jego obsługa jest utrudniona.

Kompilator PyPy stanowi mocną propozycję, jeśli ma zostać przeprowadzona kompilacja do kodu C, a ponadto nie jest używane narzędzie `numpy` ani żadna inna biblioteka zewnętrzna.

Shed Skin może okazać się przydatny, gdy kod ma zostać skompilowany do postaci kodu C, a ponadto nie używasz narzędzia `numpy` lub innych bibliotek zewnętrznych.

Jeśli wdrażasz narzędzie produkcyjne, prawdopodobnie pożądanym będzie pozostanie przy dobrze znanych narzędziach. Kompilator Cython powinien być podstawową opcją wyboru. Możesz przeczytać treść podrozdziału „Technika głębokiego uczenia prezentowana przez firmę RadimRehurek.com” z rozdziału 12. W konfiguracjach produkcyjnych używa się też kompilatora PyPy (więcej informacji zawiera podrozdział „Interpreter PyPy zapewniający powodzenie systemów przetwarzania danych i systemów internetowych” z rozdziału 12.).

Jeśli masz do czynienia z niewielkimi wymaganiami numerycznymi, zauważ, że interfejs buforu kompilatora Cython akceptuje macierze `array.array`. Jest to prosta metoda przekazywania bloku danych kompilatorowi Cython w celu przeprowadzenia szybkiego przetwarzania numerycznego bez konieczności dodawania narzędzia `numpy` jako zależności projektu.

Generalnie rzecz biorąc, kompilatory Pythran i Numba to dość nowe projekty, ale bardzo obiecujące. Z kolei kompilator Cython jest bardzo dojrzały. Kompilator PyPy jest uważany za dość dojrzały i zdecydowanie powinien być wykorzystywany w przypadku długotrwałych procesów.

Na zajęciach prowadzonych w 2014 r. przez jednego z autorów zdolny student zaimplementował wersję kodu C algorytmu zbioru Julii. Był rozczarowany, gdy stwierdził, że kod wykonywany był wolniej niż wersja skompilowana za pomocą kompilatora Cython. Okazało się, że student użył 32-bitowych liczb zmiennoprzecinkowych dla komputera 64-bitowego (takie liczby 32-bitowe są wolniej przetwarzane na komputerze 64-bitowym niż 64-bitowe liczby o podwójnej precyzji). Pomimo tego, że student był dobrym programistą używającym języka C, nie wiedział, że coś takiego mogło spowodować zmniejszenie szybkości. Po zmodyfikowaniu kodu okazało się, że wersja kodu bazująca na kompilatorze C, choć znacznie krótsza od wersji automatycznie wygenerowanej za pomocą kompilatora Cython, działała w przybliżeniu z tą samą szybkością. Pisanie czystego kodu C, porównywanie jego szybkości i określanie sposobu jego modyfikacji zajęło więcej czasu niż użycie od razu kompilatora Cython.

Jest to jedynie anegdota. Nie sugerujemy, że kompilator Cython wygeneruje najlepszy kod. Kompetentni programiści tworzący kod w języku C mogą prawdopodobnie stwierdzić, jak sprawić, że *ich* kod będzie działał szybciej od wersji wygenerowanej przez kompilator Cython.

Godne uwagi jest jednak to, że nie będzie bezpieczne przyjęcie, że ręcznie napisany kod C będzie szybszy od przekształconego kodu Python. Zawsze konieczne jest wykonywanie testów porównawczych i podejmowanie decyzji na podstawie uzyskanego dowodu. Kompilatory języka C naprawdę dobrze radzą sobie z przekształcaniem kodu w dość wydajny kod maszynowy. Z kolei język Python sprawdza się naprawdę nieźle w roli języka pozwalającego na opisanie problemu w zrozumiałym sposób. Z głową połącz ze sobą te dwie mocne strony.

## Inne przyszłe projekty

Na stronie kompilatorów *PyData* (<http://compilers.pydata.org/>) znajduje się lista kompilatorów i narzędzi o dużej wydajności. *Theano* (<http://deeplearning.net/software/theano/>) to język wysokiego poziomu, który umożliwia wyrażanie operatorów matematycznych w tablicach wielowymiarowych. Język ten jest silnie zintegrowany z narzędziem *numpy*, a ponadto może eksportować kod skompilowany dla procesorów i układów GPU. Co interesujące, okazał się przydatny członkiem społeczności zajmującej się sztuczną inteligencją z wykorzystaniem techniki głębokiego uczenia. Kompilator *Parakeet* (<http://www.parakeetpython.com/>) koncentruje się na kompilowaniu operacji obejmujących tablice narzędzia *numpy* o dużej gęstości, które korzystają z podzbioru instrukcji języka Python. Obsługuje też układy GPU.

*PyViennaCL* (<http://viennacl.sourceforge.net/pyviennacl.html>) to powiązanie języka Python z biblioteką algebry liniowej i obliczeń numerycznych *ViennaCL*. Obsługuje procesory i układy GPU z wykorzystaniem narzędzia *numpy*. Biblioteka *ViennaCL* napisana w języku C++ generuje kod dla interfejsów *CUDA*, *OpenCL* i *OpenMP*. Obsługuje ona operacje gęstej i rzadkiej algebry liniowej, bibliotekę *BLAS* i moduły rozwiązujące.

*Nuitka* (<http://nuitka.net/pages/overview.html>) to kompilator kodu Python, który ma być alternatywą dla zwykłego interpretera *CPython*, oferując opcję tworzenia skompilowanych plików wykonywalnych. W pełni obsługuje język Python 2.7, choć w naszych testach nie zapewnił żadnych zauważalnych przyrostów szybkości w przypadku prostych testów numerycznych kodu Python.

*Pyston* (<https://github.com/dropbox/pyston>) to najnowsza branżowa technologia. Korzysta z kompilatora *LLVM* i jest obsługiwana przez interfejs *Dropbox*. Z powodu braku obsługi modułów rozszerzenia kompilatora *Pyston* może dotyczyć ten sam problem co kompilatora *PyPy*, ale w ramach projektu planowane jest podjęcie próby rozwiązania go. W przeciwnym razie mało prawdopodobne jest, że obsługa narzędzia *numpy* będzie praktycznym rozwiązaniem.

Spółeczność programistów nie może raczej narzekać na niedobór opcji kompilacji. Choć wszystkie wymagają kompromisów, oferują też mnóstwo możliwości, dzięki czemu w złożonych projektach może być wykorzystana pełna moc procesorów i architektur wielordzeniowych.

## Uwaga dotycząca układów GPU

Układy graficzne GPU (*Graphics Processing Unit*) to obecnie modna technologia. Zdecydowaliśmy się jednak nie omawiać jej co najmniej do następnego wydania książki. Wynika to stąd, że w branży zachodzą szybkie zmiany, a ponadto całkiem prawdopodobne jest to, że wszystko, co zawarliśmy w tej książce, ulegnie zmianie, gdy będziesz w trakcie jej czytania. A na poważnie, nie chodzi o to, że zmiany mogą wymagać wiersze utworzonego kodu, ale o to, że wraz z rozwojem architektur konieczna może okazać się znacząca zmiana sposobu, w jaki będziesz rozwiązywać problemy.



Jeden z autorów zajmował się problemem z fizyki, korzystając przez rok z układu GPU NVIDIA GTX 480 oraz języka Python i środowiska PyCUDA. Po upływie roku została wykorzystana pełna moc układu GPU i system działał 25 razy szybciej niż ta sama funkcja na komputerze z procesorem 4-rdzeniowym. Wariant kodu dla tego procesora został napisany w języku C przy użyciu biblioteki przetwarzania równoległego. Z kolei wariant kodu dla układu GPU był tworzony głównie w języku C architektury CUDA opakowanym w środowisku PyCUDA w celu obsługi danych. Niedługo później pojawiły się w sprzedaży układy GPU z serii GTX 5xx. W efekcie zmianie uległo wiele optymalizacji dotyczących serii 4xx. Efekty prawie rocznej pracy ostatecznie zostały zaprzepaszczone na rzecz łatwiejszego do utrzymania rozwiązania w postaci kodu C, który był wykonywany z wykorzystaniem procesorów.

Choć jest to pojedynczy przykład, zwraca uwagę na zagrożenie wynikające z tworzenia niskopoziomowego kodu dla architektury CUDA (lub OpenCL). Biblioteki bazujące na układach GPU i oferujące funkcje wyższego poziomu ze znacznie większym prawdopodobieństwem będą mogły nadawać się do ogólnego zastosowania (np. biblioteki, które zapewniają interfejsy do analizy obrazu lub transkodowania wideo). Zachęcamy do rozważenia tych kwestii przed sprawdzeniem opcji tworzenia kodu bezpośrednio dla układów GPU.

Projekty, których celem jest automatyczne zarządzanie układami GPU, obejmują narzędzia Numba, Parakeet i Theano.

## Oczekiwania dotyczące przyszłego projektu kompilatora

Wśród obecnych opcji kompilatorów dostępnych jest kilka komponentów technologii o dużych możliwościach. Osobiście życzylbym sobie uogólnienia mechanizmu tworzenia adnotacji kompilatora Shed Skin, aby mógł współpracować z innymi narzędziami (na przykład generując dane wyjściowe zgodne z kompilatorem Cython w celu wygładzenia krzywej uczenia podczas rozpoczynania korzystania z tego kompilatora, a zwłaszcza w przypadku używania narzędzia numpy). Kompilator Cython jest dojrzały i integruje się silnie z językiem Python i narzędziem numpy. Jeśli krzywa uczenia oraz wymagania dotyczące obsługi nie byłyby tak bardzo zniechęcające, więcej osób zastosowałoby ten kompilator.

W dłuższej perspektywie czasowej życzeniem byłoby pojawienie się rozwiązania przypominającego kompilatory Numba i PyPy, które oferuje działanie w stylu kompilatora JIT zarówno w przypadku zwykłego kodu Python, jak i kodu narzędzia numpy. Obecnie nie zapewnia tego żadne narzędzie. Narzędzie rozwiązujące ten problem byłoby mocnym kandydatem do zastąpienia zwykłego interpretera CPython, który aktualnie jest używany przez wszystkich, bez konieczności modyfikowania kodu przez projektantów.

Przyjazna rywalizacja i duży rynek otwarty na nowe pomysły sprawiają, że nasz ekosystem staje się naprawdę wartościowym miejscem.

## Interfejsy funkcji zewnętrznych

Czasem zautomatyzowane rozwiązania po prostu nie są odpowiednie, dlatego sam musisz napisać niestandardowy kod w języku C lub Fortran. Może to wynikać z tego, że metody kompilacji nie znajdują pewnych potencjalnych optymalizacji lub wymagane jest wykorzystanie funkcji bibliotek albo języka, które są niedostępne w języku Python. We wszystkich takich przypadkach niezbędne będzie zastosowanie interfejsów funkcji zewnętrznych, które zapewniają dostęp do kodu pisanego i kompilowanego przy użyciu innego języka.

W pozostałej części rozdziału podejmiemy próbę użycia zewnętrznej biblioteki do rozwiązania równania dyfuzji dwuwymiarowej w taki sam sposób jak w rozdziale 6<sup>2</sup>. Przykład 7.20 prezentuje kod tej biblioteki, który może reprezentować zainstalowaną bibliotekę lub być kodem utworzonym własnoręcznie. Metody, którym się przyjrzymy, znakomicie nadają się do pobrania niewielkich części kodu i przemieszczenia ich do innego języka w celu przeprowadzenia specjalistycznych optymalizacji bazujących na języku.

*Przykład 7.20. Przykładowy kod C służący do rozwiązywania problemu dyfuzji dwuwymiarowej*

```
void evolve(double in[][512], double out[][512], double D, double dt) {
    int i, j;
    double laplacian;
    for (i=1; i<511; i++) {
        for (j=1; j<511; j++) {
            laplacian = in[i+1][j] + in[i-1][j] + in[i][j+1] + in[i][j-1]\
                - 4 * in[i][j];
            out[i][j] = in[i][j] + D * dt * laplacian;
        }
    }
}
```

Aby użyć tego kodu, konieczne jest skompilowanie go do postaci współużytkowanego modułu, który tworzy plik `.so`. W tym celu zostanie zastosowany kompilator `gcc` (lub dowolny inny kompilator języka C) przez wykonanie następujących poleceń:

```
$ gcc -O3 -std=gnu99 -c diffusion.c
$ gcc -shared -o diffusion.so diffusion.o
```

Ostatni plik biblioteki współużytkowanej można umieścić w dowolnym miejscu dostępnym dla kodu Python, ale w przypadku standardowej organizacji plików w systemach uniksowych takie biblioteki są przechowywane w katalogach `/usr/lib` i `/usr/local/lib`.

## ctypes

W przypadku narzędzia CPython<sup>3</sup> najbardziej podstawowy interfejs funkcji zewnętrznej jest dostępny za pośrednictwem modułu `ctypes`. Generalnie rzecz biorąc, moduł ten może być czasami dość ograniczający. Odpowiadasz za zrealizowanie każdego działania. Trochę czasu może zająć Ci upewnienie się, że wszystko jest w porządku. Taki dodatkowy poziom złożoności jest widoczny w kodzie dyfuzji z modułem `ctypes` (przykład 7.21).

*Przykład 7.21. Kod dyfuzji dwuwymiarowej z modułem ctypes*

```
import ctypes
grid_shape = (512, 512)
_diffusion = ctypes.CDLL("../diffusion.so") # ❶
# Tworzenie odwołań do typów języka C, które będą wymagane do uproszczenia przyszłego kodu
TYPE_INT = ctypes.c_int
TYPE_DOUBLE = ctypes.c_double
TYPE_DOUBLE_SS = ctypes.POINTER(ctypes.POINTER(ctypes.c_double))
# Inicjowanie sygnatury funkcji evolve do postaci:
# void evolve(int, int, double**, double**, double, double)
_diffusion.evolve.argtypes = [
```

<sup>2</sup> Dla uproszczenia nie będą implementowane warunki brzegowe.

<sup>3</sup> W bardzo dużym stopniu jest to zależne od narzędzia CPython. Inna wersja języka Python może zawierać własne wersje modułu `ctypes`, które mogą działać bardzo różnie.



```

TYPE_INT,
TYPE_INT,
TYPE_DOUBLE_SS,
TYPE_DOUBLE_SS,
TYPE_DOUBLE,
TYPE_DOUBLE,
]
_diffusion.evolve.restype = None
def evolve(grid, out, dt, D=1.0):
    # Najpierw typy języka Python są przekształcane w odpowiednie typy języka C
    cX = TYPE_INT(grid_shape[0])
    cY = TYPE_INT(grid_shape[1])
    cdt = TYPE_DOUBLE(dt)
    cD = TYPE_DOUBLE(D)
    pointer_grid = grid.ctypes.data_as(TYPE_DOUBLE_SS) # ❶
    pointer_out = out.ctypes.data_as(TYPE_DOUBLE_SS)
    # W tym miejscu możliwe jest wywołanie funkcji
    _diffusion.evolve(cX, cY, pointer_grid, pointer_out, cD, cdt) # ❷

```

- ❶ Przypomina to importowanie biblioteki `diffusion.so`.
- ❷ `grid` i `out` to tablice narzędzia `numpy`.
- ❸ Po całkowitym zakończeniu niezbędnej konfiguracji możliwe jest bezpośrednie wywołanie funkcji języka C.

Pierwszą realizowaną operacją jest „importowanie” biblioteki współużytkowanej. W tym celu używane jest wywołanie `ctypes.CDLL`. W tym wierszu może zostać określona dowolna biblioteka współużytkowana dostępna dla interpretera języka Python (na przykład moduł `ctypes-opencv` ładuje bibliotekę `libcv.so`). W wyniku tego można uzyskać obiekt `_diffusion` zawierający wszystkie elementy składowe znajdujące się w bibliotece współużytkowanej. W przykładzie biblioteka `diffusion.so` zawiera tylko jedną funkcję `evolve`, która nie jest właściwością obiektu. Jeśli biblioteka ta zawierałaby wiele funkcji i właściwości, do wszystkich dostęp byłby możliwy za pośrednictwem obiektu `_diffusion`.

Jednakże nawet pomimo tego, że obiekt `_diffusion` zawiera funkcję `evolve` dostępną w jego obrębie, nie ma informacji o tym, jak z niej skorzystać. W języku C typy są określane statycznie, a funkcja ma bardzo specyficzną sygnaturę. Aby mieć możliwość poprawnego użycia funkcji `evolve`, konieczne jest jawne ustawienie typów argumentów wejściowych i typu zwracanej wartości. Może to okazać się dość żmudne podczas projektowania bibliotek łącznie z interfejsem języka Python lub w przypadku używania szybko zmieniającej się biblioteki. Co więcej, ponieważ moduł `ctypes` nie może sprawdzić, czy zostały mu podane poprawne typy, w przypadku popełnienia błędu bez wyświetlenia żadnych informacji kod może przestać działać lub spowodować błąd segmentacji!

Oprócz ustawienia argumentów i typu zwracanej wartości obiektu funkcji konieczne jest też przekształcenie wszelkich danych, które mają zostać użyte z obiektem (jest to nazywane „rzutowaniem”). Każdy argument wysyłany do funkcji musi zostać poddany uważnemu rzutowaniu do wbudowanego typu języka C. Czasem może to okazać się dość trudne, ponieważ interpreter języka Python bardzo swobodnie traktuje swoje typy zmiennych. Na przykład w przypadku `num1 = 1e5` konieczne byłoby stwierdzenie, czy jest to typ `float` języka Python, co oznaczałoby, że należy użyć typu `ctypes.c_float`. Z kolei dla `num2 = 1e30` niezbędne byłoby zastosowanie typu `ctypes.c_double`, ponieważ w przeciwnym razie wystąpiłby błąd przepełnienia standardowego typu `float` języka C.

Narzędzie `numpy` oferuje swoim tablicom właściwość `.ctypes`, która ułatwia zapewnienie zgodności z modułem `ctypes`. Jeśli narzędzie `numpy` nie udostępniłoby takiej funkcjonalności, konieczne byłoby zainicjowanie tablicy poprawnego typu modułu `ctypes`, a następnie znalezienie położenia oryginalnych danych i wskazanie na nie przez nowy obiekt modułu `ctypes`.



Jeśli obiekt, który przekształcasz w obiekt modułu `ctypes`, nie implementuje bufora (podobnie do modułu `array`, tablic narzędzia `numpy`, modułu `cStringIO` itp.), dane będą kopiowane do nowego obiektu. W przypadku rzutowania typu `int` do typu `float` nie ma to dużego wpływu na wydajność kodu. Jeśli jednak rzutowana jest bardzo długa lista w kodzie Python, może się to wiązać ze znacznym obciążeniem! W takich przypadkach pomocne może być użycie modułu `array` lub tablicy narzędzia `numpy`, a nawet zbudowanie własnego obiektu buforowanego za pomocą modułu `struct`. Spowoduje to jednak zmniejszenie czytelności kodu, ponieważ takie obiekty są zwykle mniej elastyczne od ich odpowiedników wbudowanych w język Python.

Może się to skomplikować jeszcze bardziej w przypadku konieczności wysłania biblioteki złożonej struktury danych. Jeśli na przykład biblioteka oczekuje typu złożonego `struct` języka C, który reprezentuje punkt w przestrzeni z właściwościami `x` i `y`, niezbędne będzie zdefiniowanie następującego kodu:

```
from ctypes import Structure
class cPoint(Structure):
    _fields_ = ("x", c_int), ("y", c_int)
```

Dla tego punktu można rozpocząć tworzenie obiektów zgodnych z językiem C, inicjując obiekt `cPoint` (czyli `point = cPoint(10, 5)`). Nie wiąże się z tym ogromna ilość pracy, ale praca ta może stać się żmudna i powodować uzyskanie niezbyt trwałego kodu. Co się stanie, gdy pojawi się nowa wersja biblioteki, która nieznacznie zmieni strukturę? Spowoduje to, że kod będzie bardzo trudny do utrzymania, a ponadto przestanie być rozwijany. W przypadku takiego kodu programiści po prostu zdecydują się zrezygnować z aktualizowania bazowych bibliotek używanych przez kod.

Z tych powodów użycie modułu `ctypes` jest znakomitą opcją, gdy dysponujesz już dobrą znajomością języka C, a ponadto wymagasz możliwości dostosowania każdego aspektu interfejsu. Moduł zapewnia znakomite możliwości przenoszenia, ponieważ stanowi część standardowej biblioteki. Jeśli realizowane zadanie jest proste, oferuje proste rozwiązania. Trzeba tylko zachować ostrożność, gdyż złożoność rozwiązań opartych na module `ctypes` (i podobnych niskopoziomowych) może szybko sprawić, że staną się niemożliwe do zarządzania.

## cfffi

Uświadomienie sobie przez twórców narzędzia `cfffi`, że czasami użycie modułu `ctypes` może być dość nieporęczne, skutkuje tym, że narzędzie to podejmuje próbę uproszczenia wielu standardowych operacji wykonywanych przez programistów. W tym celu korzysta z wewnętrznego analizatora składni języka C, który rozpoznaje definicje funkcji i struktur.

W rezultacie możliwe jest po prostu utworzenie kodu C definiującego strukturę biblioteki, która ma zostać użyta. W dalszej kolejności narzędzie `cfffi` zajmie się całością żmudnych zadań, czyli importowaniem modułu i upewnieniem się, że dla funkcji wynikowych określono poprawne typy. Okazuje się, że zadania te mogą być niemal trywialne, jeśli dostępny jest kod źródłowy biblioteki. Wynika to stąd, że pliki nagłówkowe (zakończone rozszerzeniem `.h`) będą zawierać wszystkie wymagane, odpowiednie definicje. Przykład 7.22 prezentuje wersję kodu dyfuzji dwuwymiarowej bazującego na narzędziu `cfffi`.

Przykład 7.22. Kod dyfuzji dwuwymiarowej bazujący na narzędziu `ffi`

```
from ffi import FFI
ffi = FFI()
ffi.cdef(r'''
    void evolve(
        int Nx, int Ny,
        double **in, double **out,
        double D, double dt
    ); # ❶
''')
lib = ffi.dlopen("../diffusion.so")
def evolve(grid, dt, out, D=1.0):
    X, Y = grid_shape
    pointer_grid = ffi.cast('double**', grid.ctypes.data) # ❷
    pointer_out = ffi.cast('double**', out.ctypes.data)
    lib.evolve(X, Y, pointer_grid, pointer_out, D, dt)
```

- ❶ Zawartość tej definicji może być standardowo uzyskana z dokumentacji używanej biblioteki lub po sprawdzeniu jej plików nagłówkowych.
- ❷ Choć wymagane jest jeszcze rzutowanie obiektów, które nie są wbudowane w język Python, w celu użycia ich z modułem kodu C, składnia będzie wyglądać znajomo dla osób mających doświadczenie z zakresu języka C.

Inicjalizacja narzędzia `ffi` w poprzednim kodzie może być traktowana jako proces dwukrokowy. Najpierw tworzony jest obiekt `FFI`, dla którego są podawane wszystkie niezbędne globalne deklaracje języka C. Może to obejmować typy danych, a także sygnatury funkcji. Dalej możliwe jest zaimportowanie za pomocą funkcji `dlopen` biblioteki współużytkowanej do jej własnej przestrzeni nazw, która jest podrzędną przestrzenią obiektu `FFI`. Oznacza to, że możliwe byłoby załadowanie dwóch bibliotek za pomocą tej samej funkcji `evolve` do zmiennych `lib1` i `lib2`, a następnie użycie ich niezależnie (jest to znakomita opcja w przypadku debugowania i profilowania!).

Oprócz zwykłego importowania biblioteki współużytkowanej języka C narzędzie `ffi` umożliwia po prostu napisanie kodu C, który zostanie skompilowany za pomocą kompilatora JIT i funkcji `verify`. Coś takiego zapewnia wiele natychmiastowych korzyści. Z łatwością możesz ponownie utworzyć niewielkie porcje kodu C bez wywoływania pokąźnych mechanizmów osobnej biblioteki języka C. Jeśli istnieje biblioteka, której chcesz użyć, ale do idealnego działania interfejsu niezbędny jest kod łączący napisany w języku C, alternatywnie możesz po prostu wstawić go do kodu narzędzia `ffi` (przykład 7.23). Dzięki temu wszystko będzie znajdować się w centralnym miejscu. Ponieważ kod jest kompilowany za pomocą kompilatora JIT, możesz określić instrukcje kompilowania dla każdej porcji kodu, która wymaga skompilowania. Zauważ jednak, że z taką kompilacją związane jest jednorazowe obciążenie, które występuje za każdym razem, gdy uruchamiana jest funkcja `verify` w celu faktycznego przeprowadzenia kompilacji.

Przykład 7.23. Kod narzędzia `ffi` z wstawionym kodem dyfuzji dwuwymiarowej

```
ffi = FFI()
ffi.cdef(r'''
    void evolve(
        int Nx, int Ny,
        double **in, double **out,
        double D, double dt
    );
''')
```

```

lib = ffi.verify(r'''
void evolve(int Nx, int Ny,
            double in[][Ny], double out[][Ny],
            double D, double dt) {
    int i, j;
    double laplacian;
    for (i=1; i<Nx-1; i++) {
        for (j=1; j<Ny-1; j++) {
            laplacian = in[i+1][j] + in[i-1][j] + in[i][j+1] + in[i][j-1]\
                - 4 * in[i][j];
            out[i][j] = in[i][j] + D * dt * laplacian;
        }
    }
}
''', extra_compile_args=["-O3,"]) # ❶

```

- ❶ Ponieważ kod jest kompilowany za pomocą kompilatora JIT, możliwe jest też podanie odpowiednich flag kompilacji.

Inną korzyścią z funkcjonalności funkcji `verify` jest to, że świetnie radzi sobie ona ze złożonymi instrukcjami `cdef`. Jeśli na przykład zostałyby użyta biblioteka z bardzo skomplikowaną strukturą, ale pożądane byłoby zastosowanie tylko jej części, można byłoby skorzystać z częściowej definicji typu `struct`. W tym celu w definicji typu `struct` dodajemy łańcuch `...` w bloku `ffi.cdef` oraz instrukcję `#include` dla odpowiedniego pliku nagłówkowego w zamieszczonej dalej w kodzie funkcji `verify`.

Dla przykładu założymy, że korzystamy z biblioteki z plikiem nagłówkowym `complicated.h` zawierającym strukturę o następującej postaci:

```

struct Point {
    double x;
    double y;
    bool isActive;
    char *id;
    int num_times_visited;
}

```

Jeśli interesowałyby nas tylko właściwości `x` i `y`, moglibyśmy utworzyć prosty kod narzędzia `cffi`, który zajmie się wyłącznie wartościami tych właściwości:

```

from cffi import FFI
ffi = FFI()
ffi.cdef(r"""
    struct Point {
        double x;
        double y;
        ...;
    };
    struct Point do_calculation();
""")
lib = ffi.verify(r"""
#include <complicated.h>
""")

```

W dalszej kolejności można uruchomić funkcję `do_calculation` z biblioteki pliku nagłówkowego `complicated.h`, która zwróci obiekt `Point` z jego dostępnymi właściwościami `x` i `y`. Pod kątem możliwości przenoszenia jest to znakomite rozwiązanie, gdyż taki kod będzie działał bez zarzutu w systemach z różną implementacją obiektu `Point` lub po pojawieniu się nowych wersji pliku `complicated.h`, pod warunkiem że wszystkie będą mieć właściwości `x` i `y`.

Wszystko to sprawia, że `cfi` to naprawdę znakomite narzędzie, gdy używasz kodu C w kodzie Python. Jest znacznie prostsze niż moduł `ctypes`, a jednocześnie oferuje taki sam poziom szczegółowej kontroli, która może być pożądana podczas pracy bezpośrednio z interfejsem funkcji zewnętrznej.

## f2py

W przypadku wielu zastosowań naukowych język Fortran w dalszym ciągu ma status złotego standardu. Choć minęły już czasy, gdy pełnił rolę języka do ogólnych zastosowań, nadal oferuje wiele pożytecznych funkcji, które ułatwiają dość szybkie tworzenie operacji wektorowych. Ponadto w języku Fortran napisano wiele wydajnych bibliotek matematycznych (*LAPACK* (<http://www.netlib.org/lapack/>), *BLAS* (<http://www.netlib.org/blas/>) itp.). Kluczowe znaczenie może mieć możliwość użycia ich w tworzonym wydajnym kodzie Python.

W takich sytuacjach moduł `f2py` zapewnia wyjątkowo prostą metodę importowania kodu Fortran do kodu Python. Moduł ten może być tak łatwy w obsłudze z powodu przejrzystości typów w języku Fortran. Ponieważ typy mogą być bez problemu analizowane i rozpoznawane, moduł `f2py` bez trudu może sprawić, że moduł `CPython`, który korzysta z wbudowanej w język C obsługi funkcji zewnętrznych, użyje kodu Fortran. Oznacza to, że podczas stosowania modułu `f2py` w rzeczywistości ma miejsce automatyczne generowanie modułu C, który potrafi użyć kodu Fortran! W efekcie wiele niejasności związanych z rozwiązaniami bazującymi na narzędziach `ctypes` i `cfi` po prostu nie istnieje.

Przykład 7.24 prezentuje prosty kod zgodny z modułem `f2py`, który służy do rozwiązywania równania dyfuzji. Okazuje się, że cały wbudowany kod Fortran jest zgodny z tym modułem. Jednakże adnotacje argumentów funkcji (instrukcje poprzedzone przez `!f2py`) upraszczają wynikowy moduł Python i przyczyniają się do uzyskania interfejsu prostszego w użyciu. Adnotacje niejawnie informują moduł `f2py` o tym, czy argumentem mają być jedynie dane wyjściowe, czy tylko dane wejściowe, czy też ma nim być coś, co ma zostać zmodyfikowane lokalnie lub całkowicie ukryte. Ukryty typ jest szczególnie przydatny w przypadku wielkości wektorów: w kodzie Fortran może być wymagane jawne określenie tych wartości, w kodzie Python natomiast takie informacje są od razu dostępne. Po ustawieniu typu jako ukrytego moduł `f2py` może automatycznie określić te wartości, co zasadniczo oznacza ukrywanie ich w ostatecznym interfejsie Python.

*Przykład 7.24. Kod Fortran dyfuzji dwuwymiarowej z adnotacjami modułu `f2py`*

```
SUBROUTINE evolve(grid, next_grid, D, dt, N, M)
    !f2py threadsafe
    !f2py intent(in) grid
    !f2py intent(inplace) next_grid
    !f2py intent(in) D
    !f2py intent(in) dt
    !f2py intent(hide) N
    !f2py intent(hide) M
    INTEGER :: N, M
    DOUBLE PRECISION, DIMENSION(N,M) :: grid, next_grid
    DOUBLE PRECISION, DIMENSION(N-2, M-2) :: laplacian
    DOUBLE PRECISION :: D, dt
    laplacian = grid(3:N, 2:M-1) + grid(1:N-2, 2:M-1) + &
        grid(2:N-1, 3:M) + grid(2:N-1, 1:M-2) - 4 * grid(2:N-1, 2:M-1)
    next_grid(2:N-1, 2:M-1) = grid(2:N-1, 2:M-1) + D * dt * laplacian
END SUBROUTINE evolve
```

W celu przekształcenia kodu w moduł Python zostanie uruchomione następujące polecenie:

```
$ f2py -c -m diffusion --fcompiler=gfortran --opt='-O3' diffusion.f90
```

Spowoduje to utworzenie pliku *diffusion.so*, który może zostać zaimportowany bezpośrednio do kodu Python.

Poeksperymentowanie z wynikowym modułem w trybie interaktywnym pozwala zauważyć korzyści, jakie zapewnił moduł *f2py* dzięki użyciu adnotacji, a także możliwość analizowania kodu Fortran:

```
In [1]: import diffusion
In [2]: diffusion?
Type:      module
String form: <module 'diffusion' from 'diffusion.so'>
File:      .../examples/compilation/f2py/diffusion.so
Docstring:
This module 'diffusion' is auto-generated with f2py (version:2).
Functions:
  evolve(grid,next_grid,d,dt)
.
In [3]: diffusion.evolve?
Type:      fortran
String form: <fortran object>
Docstring:
evolve(grid,next_grid,d,dt)
Wrapper for ``evolve``.
Parameters
grid : input rank-2 array('d') with bounds (n,m)
next_grid : rank-2 array('d') with bounds (n,m)
d : input float
dt : input float
```

Powyższe dane pokazują, że wynik generowania przeprowadzonego przez moduł *f2py* jest automatycznie dokumentowany, a interfejs jest dość uproszczony. Na przykład zamiast zmuszać nas do wyodrębniania wielkości wektorów, moduł *f2py* sprawdza, jak automatycznie znaleźć te informacje, i po prostu ukrywa je w wynikowym interfejsie. Okazuje się, że wynikowa funkcja *evolve* w swojej sygnaturze wygląda tak samo jak wersja czystego kodu Python utworzonego w przykładzie 6.14.

Jedyną rzeczą, o którą trzeba zadbać, jest uporządkowanie tablic narzędzia *numpy* w pamięci. Ponieważ większość zadań realizowanych z wykorzystaniem narzędzia *numpy* i języka Python skupia się na kodzie uzyskanym z kodu C, zawsze stosuj konwencję języka C dotyczącą uporządkowania danych w pamięci (określanego mianem *głównego uporządkowania wierszowego*). W języku Fortran wykorzystywana jest inna konwencja (*główne uporządkowanie kolumnowe*), która musi być przestrzegana przez używane wektory. Uporządkowania te po prostu określają, czy dla tablicy dwuwymiarowej kolumny lub wiersze są ciągłe w pamięci<sup>4</sup>. Na szczęście sprowadza się to jedynie do określenia parametru `order='F'` dla narzędzia *numpy* podczas deklarowania wektorów.

---

<sup>4</sup> Więcej informacji zawiera strona serwisu Wikipedia pod następującym adresem: [http://en.wikipedia.org/wiki/Row-major\\_order](http://en.wikipedia.org/wiki/Row-major_order).



Różnica między głównym uporządkowaniem wierszowym i kolumnowym oznacza, że macierz  $\begin{bmatrix} 1, & 2, \\ 3, & 4 \end{bmatrix}$  zostanie zapisana w pamięci w postaci  $[1, 2, 3, 4]$  (główne uporządkowanie wierszowe) oraz jako  $[1, 3, 2, 4]$  w przypadku głównego uporządkowania kolumnowego. Różni się to jedynie konwencją. Jeśli jest właściwie stosowana, w rzeczywistości nie powoduje żadnych negatywnych konsekwencji dotyczących wydajności.

W rezultacie uzyskujemy poniższy kod, który umożliwia użycie podprocedury kodu Fortran. Kod jest taki sam jak użyty w przykładzie 6.14. Różni się jedynie importowaniem z biblioteki bazującej na module `f2py` i jawnym uporządkowaniem danych zgodnie z wymaganiami języka Fortran:

```
from diffusion import evolve
def run_experiment(num_iterations):
    next_grid = np.zeros(grid_shape, dtype=np.double, order='F') # ❶
    grid = np.zeros(grid_shape, dtype=np.double, order='F')
    # ...standardowa inicjalizacja...
    for i in range(num_iterations):
        evolve(grid, next_grid, 1.0, 0.1)
        grid, next_grid = next_grid, grid
```

❶ W przypadku języka Fortran liczby są porządkowane w pamięci w odmienny sposób, dlatego trzeba pamiętać o ustawieniu tablic narzędzia `numpy` pod kątem korzystania z tego standardu.

## Moduł narzędzia CPython

Zawsze możliwe jest przejście bezpośrednio do poziomu interfejsu API narzędzia CPython i utworzenie jego modułu. Wymaga to napisania kodu w ten sam sposób, w jaki zaprojektowano narzędzie CPython, a także zadbania o wszystkie interakcje między kodem i implementacją narzędzia CPython.

Zaletą tego rozwiązania są jego niebywale możliwości dotyczące przenoszenia (zależnie od wersji języka Python). Nie są konieczne żadne moduły lub biblioteki zewnętrzne, ale jedynie kompilator kodu C i język Python! Niemniej jednak rozwiązanie to niekoniecznie zapewnia odpowiednie skalowanie w przypadku nowych wersji języka Python. Na przykład moduły narzędzia CPython utworzone dla języka Python 2.7 współpracują z językiem Python 3.

Z możliwościami przenoszenia wiąże się jednak duży koszt. Odpowiadasz za każdy aspekt interfejsu między kodem Python i modulem. Może to oznaczać, że nawet najprostsze zadania będą liczyć dziesiątki wierszy kodu. Aby na przykład uzyskać interfejs z biblioteką procesu dyfuzji z przykładu 7.20, konieczne jest napisanie 28 wierszy kodu tylko w celu wczytania argumentów do funkcji i poddania ich analizie (przykład 7.25). Oczywiście oznacza to, że masz możliwość niezwykle dokładnego kontrolowania tego, co ma miejsce. Sprowadza się to nawet do możliwości ręcznej zmiany liczników odwołań dla procesu czyszczenia pamięci kodu Python (może to być przyczyną wielu utrudnień podczas tworzenia modułów narzędzia CPython, które korzystają z wbudowanych typów języka Python). Z tego powodu wynikowy kod będzie zwykle nieznacznie szybszy niż w przypadku innych metod interfejsu.



## Przykład 7.25. Moduł narzędzia CPython zapewniający interfejs dla biblioteki dyfuzji dwuwymiarowej

```
// python_interface.c
// -interfejs modulu narzędzia CPython dla pliku diffusion.c
#define NPY_NO_DEPRECATED_API NPY_1_7_API_VERSION
#include <Python.h>
#include <numpy/arrayobject.h>
#include "diffusion.h"
/* Literaty docstring */
static char module_docstring[] =
    "Zapewnia zoptymalizowaną metodę rozwiązywania równania dyfuzji";
static char cdiffusion_evolve_docstring[] =
    "Rozwijanie siatki dwuwymiarowej za pomocą równania dyfuzji";
PyObject* py_evolve(PyObject* self, PyObject* args) {
    PyObject* data;
    PyObject* next_grid;
    double dt, D=1.0;
    /* Funkcja „rozwijania” będzie mieć sygnaturę:
     *     evolve(data, next_grid, dt, D=1)
     */
    if (!PyArg_ParseTuple(args, "00d|d", &data, &next_grid, &dt, &D)) {
        PyErr_SetString(PyExc_RuntimeError, "Niepoprawne argumenty");
        return NULL;
    }
    /* Sprawdzenie, czy tablice narzędzia numpy są ciągłe w pamięci */
    if (!PyArray_Check(data) || !PyArray_ISCONTIGUOUS(data)) {
        PyErr_SetString(PyExc_RuntimeError, "Tablica data nie jest ciągłą tablicą.");
        return NULL;
    }
    if (!PyArray_Check(next_grid) || !PyArray_ISCONTIGUOUS(next_grid)) {
        PyErr_SetString(PyExc_RuntimeError, "Tablica next_grid nie jest ciągłą tablicą.");
        return NULL;
    }
    /* Sprawdzenie, czy tablice siatki data i next_grid są takiego samego typu i mają identyczne wymiary */
    if (PyArray_TYPE(data) != PyArray_TYPE(next_grid)) {
        PyErr_SetString(PyExc_RuntimeError,
            "Tablice next_grid i data powinny być tego samego typu.");
        return NULL;
    }
    if (PyArray_NDIM(data) != 2) {
        PyErr_SetString(PyExc_RuntimeError, "Tablica data powinna być dwuwymiarowa.");
        return NULL;
    }
    if (PyArray_NDIM(next_grid) != 2) {
        PyErr_SetString(PyExc_RuntimeError, "Tablica next_grid powinna być dwuwymiarowa.");
        return NULL;
    }
    if ((PyArray_DIM(data,0) != PyArrayDim(next_grid,0)) ||
        (PyArray_DIM(data,1) != PyArrayDim(next_grid,1))) {
        PyErr_SetString(PyExc_RuntimeError,
            "Tablice data i next_grid muszą mieć takie same wymiary.");
        return NULL;
    }
    /* Pobranie wielkości przetwarzanej siatki */
    const int N = (int) PyArray_DIM(data, 0);
    const int M = (int) PyArray_DIM(data, 1);
    evolve(
        N,
        M,
        PyArray_DATA(data),
        PyArray_DATA(next_grid),
        D,

```

```

        dt
    );
    Py_XINCREf(next_grid);
    return next_grid;
}
/* Specyfikacja modułu */
static PyMethodDef module_methods[] = {
    /* { nazwa metody, funkcja języka C, typy argumentów, docstring } */
    { "evolve" , py_evolve , METH_VARARGS , cdiffusion_evolve_docstring } ,
    { NULL , NULL , 0 , NULL }
};
/* Inicjowanie modułu */
PyMODINIT_FUNC initediffusion(void)
{
    PyObject *m = Py_InitModule3("cdiffusion", module_methods, module_docstring);
    if (m == NULL)
        return;
    /* Ładowanie funkcji narzędzia numpy */
    import_array();
}

```



Podsumowując, z tej metody należy korzystać tylko w ostateczności. Choć zapewnia sporo informacji podczas tworzenia modułu narzędzia CPython, wynikowy kod nie oferuje takich możliwości ponownego wykorzystania lub utrzymywania jak inne potencjalne metody. Wprowadzanie minimalnych zmian w module wymaga często jego całkowitej przebudowy. Tak naprawdę kod modułu i plik *setup.py* wymagany do jego kompilacji (przykład 7.26) dołączamy ku przestrodze.

Aby utworzyć powyższy kod, konieczne jest napisanie skryptu *setup.py*, który używa modułu *distutils* do określenia sposobu budowania kodu zgodnego z językiem Python (przykład 7.26). Oprócz standardowego modułu *distutils* narzędzie *numpy* zapewnia własny moduł, aby ułatwić dodawanie integracji narzędzia *numpy* do modułów narzędzia CPython.

#### Przykład 7.26. Plik konfiguracyjny dla interfejsu dyfuzji modułu narzędzia CPython

```

"""
Plik setup.py dla modułu dyfuzji narzędzia CPython. Rozszerzenie może zostać utworzone za pomocą polecenia:
$ python setup.py build_ext --inplace
Utworzy ono plik __cdiffusion.so__, który może być importowany bezpośrednio do
kodu Python
"""
from distutils.core import setup, Extension
import numpy.distutils.misc_util
__version__ = "0.1"
cdiffusion = Extension(
    'cdiffusion',
    sources = ['cdiffusion/cdiffusion.c', 'cdiffusion/python_interface.c'],
    extra_compile_args = ["-O3", "-std=c99", "-Wall", "-p", "-pg", ],
    extra_link_args = ["-lc"],
)
setup (
    name = 'diffusion',
    version = __version__,
    ext_modules = [cdiffusion,],
    packages = ["diffusion", ],
    include_dirs = numpy.distutils.misc_util.get_numpy_include_dirs(),
)

```

Wynikiem wykonania tego kodu jest plik `cdiffusion.so`, który może być importowany bezpośrednio z kodu Python i całkiem łatwo używany. Ponieważ uzyskano pełną kontrolę sygnatury funkcji wynikowej, a także tego, jak dokładnie kod C prowadził interakcję z biblioteką, możliwe było (po wykonaniu sporej ilości pracy) stworzenie prostego do zastosowania modułu:

```
from cdiffusion import evolve
def run_experiment(num_iterations):
    next_grid = np.zeros(grid_shape, dtype=np.double)
    grid = np.zeros(grid_shape, dtype=np.double)
    # ...standardowa inicjalizacja...
    for i in range(num_iterations):
        evolve(grid, next_grid, 1.0, 0.1)
        grid, next_grid = next_grid, grid
```

## Podsumowanie

Różne strategie zaprezentowane w tym rozdziale umożliwiają dostosowanie kodu w różnym stopniu w celu zmniejszenia liczby instrukcji, jakie procesor musi wykonać, a także zwiększenia efektywności programów. Choć czasem można to uzyskać w sposób algorytmiczny, często trzeba zrobić to ręcznie (zajrzyj do podrozdziału „Porównanie kompilatorów JIT i AOT”). Ponadto metody te należy sporadycznie zastosować po prostu w celu użycia bibliotek, które zostały już utworzone w innych językach. Niezależnie od motywacji język Python pozwala wykorzystać wzrost wydajności możliwy do uzyskania przy użyciu innych języków w przypadku niektórych problemów przy jednoczesnym zachowaniu szczegółowości i elastyczności, jeśli jest to wymagane.

Godne uwagi jest jednak to, że opisane optymalizacje są przeprowadzane w celu poprawienia wydajności wyłącznie instrukcji procesora. W przypadku operacji wejścia-wyjścia powiązanych z problemem bazującym na użyciu procesora skompilowanie kodu może nie zapewnić rozsądnych przyspieszeń. W odniesieniu do takich problemów konieczne będzie ponowne przeanalizowanie dostępnych rozwiązań i ewentualne użycie przetwarzania równoległego, które pozwala na jednoczesne uruchamianie różnych zadań.

## A

adnotacje typu, 144  
aktualizowanie  
  klastra, 252  
  siatki, 109  
algorytm  
  HyperLogLog, 302  
  HyperLogLog++, 290  
  LogLog, 301  
  odchylenia standardowego, 98  
  online, 98  
  sortowania, 72  
  techniki głębokiego uczenia, 313  
  word2vec, 313  
  wyszukiwania, 72  
alokacja, 109  
  pamięci, 110, 111, 113  
  pamięci statycznej, 315  
analizowanie  
  bloku kodu, 138, 141  
  kodu Fortran, 170  
  serwisu społecznościowego, 318  
  tekstu, 313  
  wykorzystania pamięci, 276  
  zbioru danych, 97  
AOT, Ahead of Time, 136  
aplikacje internetowe, 27, 323  
aproksymacja różnic skończonych, 105  
asynchroniczna kolejka zadań, 269  
asynchroniczne dodawanie zadań, 220  
atrybucja, 13  
AWS, Amazon Web Services, 249

## B

baza danych, 27, 190, 323  
biblioteka  
  array, 27  
  asyncio, 178, 188, 193

biopython, 27  
BLAS, 27, 162, 169  
bytes, 27  
collections, 27  
diffusion.so, 165  
gevent, 181–183, 187, 193  
grequests, 183  
itertools, 97  
LAPACK, 169  
LIBLINEAR, 26  
LIBSVM, 26  
math, 27  
numpy, 27  
OpenCV, 28  
pandas, 27, 28  
PrettyTable, 238  
scikit-learn, 27  
scipy, 27, 129, 130  
sqlite3, 27  
tornado, 27  
unicode, 27  
ViennaCL, 162  
biblioteki asynchroniczne, 181  
blokada GIL, 153, 160, 197, 206  
blokowanie  
  interpretera, 26  
  lokalne, 247  
  obiektu Value, 245  
  plików, 242  
błąd, 243, 290, 296, 302  
błędy zaokrąglania, 67  
BPython, 28  
BSB, Backside Bus, 21

## C

centralna jednostka obliczeniowa, 16  
chronologia żądań, 180, 184, 187, 190  
ciąg Fibonacciego, 96  
CPU, Central Processing Unit, 16

- czas
  - działania funkcji, 118
  - działania pętli, 81
  - działania schematów, 129
  - tworzenia instancji, 78
  - wykonywania programu, 51
  - wykonywania wyrażeń, 49
  - wyszukiwania, 71, 281, 282
- częstość występowania dzielników, 222
- czyszczenie
  - flagi, 228
  - pamięci, 53, 158

## D

- dane
  - losowe, 19
  - sieciowe, 179, 183–185, 188
  - wyjściowe, 57, 65, 141, 237
- debugowanie, 320
- debugowanie identyfikowanych typów, 155
- definicja entropii, 87
- definiowanie
  - dekoratora, 38
  - klasy, 86
- deklarowanie wektorów, 170
- dekorator, 37
  - @jit, 155
  - @profile, 64
  - @require, 262
  - @timefn, 39
  - czasu, 30
- dekoratory fikcyjne, 47
- dezasemblacja, 90
- diagnozowanie wykorzystania pamięci, 51
- dodawanie
  - adnotacji, 157
  - adnotacji typu, 143
  - etykiet, 55
  - flag kompilatora, 153
  - operatora prange, 153
  - typów podstawowych, 143
- dokumentacja, 39
  - kompilatora Cython, 141
  - modułu bisect, 72
  - modułu lockfile, 244
  - modułu multiprocessing, 244
- dokumenty PEP, 189
- dostarczanie komunikatów, 263
- drzewa trie
  - drzewo, 271
    - datrie, 285, 304
    - trie, 280, 283

- trie HAT, 286
- trie Marisa, 285
- duże operacje macierzowe, 127
- dyfuzja, 104, 119
  - dwuwymiarowa, 107–110, 164, 167
  - jednowymiarowa, 106, 107
- dysk twardy SSD, 20
- dystrybucja zadań, 324
- działanie filtrów Blooma, 295

## E

- efektywne profilowanie, 30
- entropia, 86, 87
- etykieta calculate\_output, 55

## F

- fałszywa skala szarości, 32, 36
- filtr laplace, 130
- filtry Blooma, 295, 297
- firma
  - Adaptive Lab, 308
  - Lyst.com, 315
  - RadimRehurek.com, 310
  - Smesh, 318
- flaga, 228–233
  - CHECK EVERY, 234
  - FLAG\_CLEAR, 228
  - FLAG\_SET, 228, 235
  - przeñośności, 40
- format JSON, 256
- fragmentacja, 115
- fragmentacja pamięci, 111
- FSB, Frontside Bus, 21
- funkcja
  - %timeit, 62
  - \_\_builtin\_\_, 65
  - \_\_hash\_\_, 86
  - \_\_main\_\_, 149, 241
  - abs, 33, 137
  - anomalous\_dates.next, 100
  - apply\_sync, 259
  - asizeof, 277
  - assert, 241
  - calc\_pure\_python, 37, 43, 57
  - calculate\_z, 150, 157
  - calculate\_z\_serial\_purepython, 42, 51, 54
  - chain, 97
  - check\_anomaly, 99, 100
  - check\_prime, 213, 226
  - check\_prime\_in\_range, 230
  - cycle, 97

- day\_grouper, 100
- definite\_primes\_queue, 217
- evolve, 108, 110, 156, 165
- feed\_new\_jobs, 220
- fibonacci\_transform, 96
- fn\_expressive, 63
- fn\_terse, 63
- getsizeof, 276
- gevent.iwait, 182
- hash, 83
- hpy.setrelheap, 58
- id, 86
- islice, 97
- iwait, 185
- lambda, 98
- laplace, 130
- laplacian, 124–130
- main, 36, 203
- memit, 277
- norm\_square\_numpy, 117
- ord, 84
- range, 36, 55, 95
- roll, 119
- roll\_add, 125
- set, 282
- takewhile, 97
- time.time(), 30
- timefn, 38
- timeit, 281
- total.\_\_add\_\_, 63
- twoletter\_hash, 89
- wait, 181
- work, 243, 244
- worker\_fn, 238, 240
- xrange, 55, 93, 95
- yield, 94

funkcje

- magiczne, 39
- mieszania, 84, 86, 88
- powiązane z procesorem, 36
- wbudowane, 62, 97

## G

- generator, 93, 95
  - aktywnego wykresu, 58
  - kongruencji liniowej, 83
  - liczb losowych, 210
  - text\_example.readers, 281
  - zbioru Julii, 34
- GIL, Global Interpreter Lock, 153
- globalna blokada interpretera GIL, 19
- głębokie uczenie, 310

- główne uporządkowanie
  - kolumnowe, 170
  - wierszowe, 170
- GPU, Graphics Processing Unit, 16, 162
- graf, 271
- graf słów DAWG, 279, 283, 284
- graficzne jednostki obliczeniowe, 16
- greenlet, 181
- grupowanie danych, 98

## H

- hiperwątki, 216
- hipoteza, 50

## I

- IDE, Integrated Development Environment, 28
- idealna funkcja mieszania, 88
- idempotentność, 293
- identyfikator
  - id, 122
  - PID, 237
- identyfikowanie wąskich gardeł, 46
- iloczyn skalarny, 118
- implementacja
  - algorytmu HyperLogLog, 302
  - algorytmu LogLog, 301
  - filtru Blooma, 296
  - licznika LogLog, 300
  - licznika Morrisa, 291
  - struktury KMinValues, 294
- importowanie
  - kodu Fortran, 169
  - modułów, 260
  - modułu, 140, 148
  - modułu zewnętrznego, 148
- inferencja typów, 148
- informacje o
  - elemencie wywołującym, 44
  - profilowaniu, 38
  - typie, 70, 136, 155
- inicjalizacja
  - dyfuzji dwuwymiarowej, 109
  - narzędzia cffi, 167
- inspekcja
  - obiektów, 56
  - sterty, 56
- instalowanie
  - modułów, 159
  - modułu Parallel Python, 257
  - narzędzia line\_profiler, 47
  - narzędzia pip, 159
  - narzędzia runsnake, 46

instrukcja  
  import, 148  
  print, 37  
  SIMD, 17  
  yield, 178  
interfejs  
  API, 28, 134, 152  
  API HTTP, 190  
  CUDA, 162  
  FileLock, 245  
  IPython, 259  
  memoryview, 151  
  MPI, 222, 259  
  OpenCL, 162  
  OpenMP, 152–154, 162, 196  
  półłoki, 28  
  StrictRedis, 230  
interfejsy funkcji zewnętrznych, 163  
interpreter, 25  
  CPython, 10  
  GIL, 26  
  PyPy, 157–160, 322  
IPC, Instructions Per Cycle, 16  
IPC, Interprocess Communication, 199  
IPython, 28  
IPython Notebook, 28  
iterator, 93, 96  
iterator ifilter, 100  
iterowanie, 81

## J

jednostka MiB, 53  
jednostka obliczeniowa, 16  
  CPU, 16  
  GPU, 16  
  IPC, 16  
jednostki pamięci, 19  
język  
  C, 133  
  C++, 138  
  Fortran, 133, 169  
  GO, 263  
  Java, 199  
  Python 2.7, 11  
  Python 3, 12  
  Theano, 162  
JIT, Just in Time, 10, 133, 136

## K

katalog bin, 159  
klasa  
  AsyncBatcher, 191, 192  
  CompositeError, 262  
  Point, 87  
klastr, 249, 250  
  Beowulfa, 249  
  IPython, 259  
klastrowanie  
  wady, 251  
  zalety, 250  
klastry  
  lokalne, 257, 262  
  modułu IPython Parallel, 257  
  produkcyjne, 262  
klucz, 81, 83, 85, 98  
kod  
  asynchroniczny, 178  
  bajtowy, 62  
  C, 142, 164  
  deterministyczny, 36  
  dyfuzji, 119  
  Fortran, 169  
kodowanie UTF-8, 278  
kolejka, 221, 263  
  Celery, 269  
  FIFO, 198, 218  
  PyRes, 221  
  Queue, 220  
kolejki  
  zadań, 249, 325  
  zadań roboczych, 217  
kolekcja, 276  
kolekcja unikalnych kluczy, 81  
kolizje wartości mieszania, 85  
kompilator  
  AOT, 133, 136  
  Cython, 139, 146, 151, 161  
  g++, 137  
  gcc, 137  
  JIT, 133, 136, 154  
  kodu C, 137  
  LLVM, 133, 154  
  Nuitka, 162  
  Numba, 134, 154, 161  
  Parakeet, 162  
  PyPy, 10, 149, 161  
  Pyston, 162  
  Python-C++, 147, 155  
  Pythran, 134, 155  
  Shed Skin, 147, 150, 161



- kompilatory języka C, 162
- kompilowanie, 133, 139
- komponent
  - ctypes, 198
  - Manager, 198
  - Pipe, 198
  - Pool, 198, 199
  - Process, 198
  - Queue, 198
- kompresja, 271
- komputer zdalny, 261
- komunikacja międzyprocesowa, 199, 217, 221, 248
- komunikaty, 263
- komunikaty MPI, 222
- konfigurowanie procesów, 244
- kongruencja liniowa, 83
- konstrukcja future, 177, 178, 181
- konsument danych, 264
- kontrola poprawności, 36
- kontroler, 259
- konwerter
  - Fortran-Python, 134
  - Python-C, 134
- kopie pamięci, 150
- kopiowanie profilu, 261
- koszt funkcji, 44
- koszt kopiowania danych, 150
- krotki, 69, 73, 77

## L

- leniwe wczytywanie danych, 98
- licencja Creative Commons, 13
- liczba
  - instrukcji, 120
  - przydziałów pamięci, 122, 123
  - transferów, 115
  - współbieżnych żądań, 181
  - zespólona, 33, 137
  - zmiennoprzecinkowa, 137
  - żądań współbieżnych, 182
- liczby
  - Fibonacciego, 96
  - losowe, 208
  - pierwsze, 211, 227
- licznik
  - branches, 115
  - branch-miss, 115
  - context-switches, 113
  - CPU-migrations, 113
  - instructions, 114, 126
  - LogLog, 299, 300
  - Morrisa, 290, 291

- page-faults, 126
- stalled-cycles, 115
- stalled-cycles-backend, 114
- stalled-cycles-frontend, 114
- liczniki wydajności, 113, 120–130
- lista, 69, 73, 107
  - kompilatorów, 162
  - new\_grid, 110
- losowość sekwencji zadań, 215

## M

- macierze, 103
- magazyn danych NAS, 21
- magistrala
  - BSB, 16, 21
  - FSB, 16, 21
- mapowanie obiektowo-relacyjne, 323
- maska, 82, 88
- maszyna wirtualna, 23, 25
- maszyna wirtualna PyPy, 133
- Matlab, 28
- mebibajt, 53
- mechanizm
  - OCR, 324
  - rekomendacji, 316
  - sondowania, 83
- menedżer
  - kontekstu, 55, 245–247
  - zadań PyRes, 269
- metoda
  - Eulera, 105
  - Monte Carlo, 199, 200
- metodologia projektowa, 309
- metody
  - pomiaru czasu, 37
  - synchronizacji, 242
  - typu LogLog, 300
- mieszanie, hashable, 79
- moduł
  - array, 116, 151, 274
  - asyncio, 189
  - bisect, 72, 282
  - concurrent.futures, 199
  - cProfile, 41
  - ctypes, 164, 165
  - dis, 60
  - distutils, 173
  - f2py, 169, 170
  - IPython Parallel, 259, 262
  - itertools, 98
  - lockfile, 244, 245
  - memory\_profiler, 52, 53

- moduł
  - mmap, 232, 233
  - multiprocessing, 192, 195–248
    - komponenty, 198
    - ograniczenia, 200
    - strategie użycia, 215
    - współużytkowanie danych, 236
  - narzędzia CPython, 171, 172
  - numexpr, 127, 128
  - numpy.array, 151
  - Parallel Python, 257, 258
  - pickle, 219
  - pp, 259
  - requests, 179
  - struct, 166
  - timeit, 38, 39
- modyfikowanie kodu źródłowego, 53
- monitorowanie, 317, 320
- monitorowanie pamięci, 313
- MPI, Message Passing Interface, 222, 259
- numpy, 74, 103, 116–128, 151, 170, 199, 209, 236, 241, 248, 275
- perf, 112, 113, 115
- pip, 159
- profile, 42
- PyPy, 134, 157
- Pythran, 134, 155
- runsnake, 46
- Shed Skin, 134, 137, 147
- SoMA, 307
- System Monitor, 40
- Upstart, 255
- word2vec, 313, 314
- NAS, Network Attached Storage, 21
- nawias kwadratowy, 54
- niejawna pętla, 118
- niskopoziomowe typy numeryczne, 118
- notka dokumentacyjna, 38

## O

## N

- narzędzia
  - klastrowania, 268
  - profilujące, 42
- narzędzie
  - Circus, 255
  - cfi, 166, 167, 168
  - cProfile, 42
  - cpyext, 159
  - CPython, 31, 60, 151, 164
  - cron, 255
  - Cython, 28, 133, 137, 139
  - diff, 67
  - Docker, 321
  - dowser, 58, 67
  - dozer, 67
  - Ganglia, 256
  - Graphite, 317
  - heapy, 30, 56
  - hotshot, 42
  - htop, 237
  - IPython, 159, 257
  - jitviewer, 160
  - joblib, 216
  - line\_profiler, 30, 46, 64, 109
  - lsprof, 44
  - make, 149
  - memory\_profiler, 31, 51, 64, 65
  - mprof, 54, 55
  - nosetests, 64, 65
  - Numba, 133, 154
  - obiekt
    - \_diffusion, 165
    - BLOB, 266
    - deque, 100
    - FileLock, 245, 247
    - HubFactory, 260
    - list, 281
    - Lock, 246, 247
    - Manager.Value, 228
    - multiprocessing.Value, 245
    - multprocessing.Array, 239
    - Pool, 203, 216, 225, 227
    - Process, 244
    - Queue, 197, 216, 219
    - RawValue, 232, 247
    - Unicode, 278
    - Value, 245
    - vector, 117
  - obiekty
    - języka Python, 201
    - listy, 151
    - Python, 208
    - typów podstawowych, 272
    - Unicode, 277
  - obietnica wyniku, 178
  - obliczanie
    - dyfuzji dwuwymiarowej, 107
    - liczby zespolonej, 33
    - listy output, 150
    - pochodnych, 119
    - zbioru Julii, 34

- obliczenia
  - macierzowe, 103
  - probabilistyczne, 290
  - rozproszone, 266
  - wektorowe, 103
- obraz systemu, 256
- obrót, 125
- odchylenie standardowe, 98
- odczyt sekwencyjny, 19
- odnośniki TRACE, 60
- odtworzenie flagi, 233
- ograniczanie liczby operacji, 133
- opcje kompilatorów, 160
- OpenMP, Open Multi-Processing, 152
- operacja
  - FMA, 16
  - numpy.dot, 117
  - resize, 75
  - sqrt, 145
- operacje
  - dołączania, 76
  - macierzowe, 127
  - wejścia-wyjścia, 175, 188
  - wewnętrzne, 121–124
- operator
  - \_\_cmp\_\_, 86
  - append, 77
  - prange, 153, 154
- opóźnienie, 19
- oprogramowanie Matlab, 28
- optymalizacja, 64, 132, 146, 313
  - operacji macierzowych, 127
  - operacji wektorowych, 127
  - PGO, 150
  - selektywna, 124
  - wyszukiwarek, 313
  - obciążającej logiki, 234
- optymalna funkcja mieszania, 88
- ORM, Object Relational Mapper, 323
- oszczędzenie pamięci, 271

## P

- pakiet
  - countmemaybe, 294
  - distarray, 269
  - guppy, 56
  - java.util.concurrent, 199
  - tornado, 185–187
  - wxPython, 46
- pamięć
  - podręczna, 16, 20
  - RAM, 16, 20, 53, 203, 271
- parametr chunksize, 213–216
- PEP, Python Enhancement Proposals, 189
- pętla
  - for, 63, 93, 94
  - while, 49, 50, 145
  - zdarzeń, 176, 186
  - zwrotna, 231
- pętle
  - niejawne, 118
  - wewnętrzne, 81
- PGO, Profile-Guided Optimization, 150
- pierwiastek kwadratowy, 137, 145
- plik
  - cdiffusion.so, 174
  - complicated.h, 168
  - cythonfn.html, 141
  - cythonfn.pyx, 139, 140
  - diffusion.so, 170
  - diffusion\_numpy.so, 156
  - ipcontroller-engine.json, 261
  - julia1.py, 139
  - Makefile, 149
  - setup.py, 139, 173
  - shedskinfn.cpp, 149
  - shedskinfn.hpp, 149
  - shedskinfn.so, 149
  - shedskinfn.ss.py, 149
- pliki
  - .deb, 256
  - .lprof, 47
  - .pyx, 146
  - .rpm, 256
  - .so, 139
  - statystyk, 46, 54
- pobieranie, 82
- podejmowanie decyzji, 115
- polecenie
  - grep, 239
  - ipcluster, 259
  - memit, 273
  - pmap, 239
  - print, 42
  - ps, 239
  - push, 260
  - redis-cli, 231
  - shedskin, 149
  - polecenie time, 40
- połączenie generatorów, 99
- pomiar
  - czasu, 37, 40, 43, 88
  - czasu sortowania, 282
  - wierszy kodu, 46
  - wykorzystania pamięci, 272, 273

- porównanie
    - grafu i drzew, 280
    - kompilatorów JIT i AOT, 136
    - list i krotek, 73
    - probabilistycznych struktur danych, 303, 304
    - programów, 176
  - port numpypy, 159
  - potokowanie, 112, 266
  - powłoka
    - interaktywna, 28
    - IPython, 260
  - prawo Amdahla, 18, 196
  - probabilistyczne struktury danych, 289, 303–305
  - problem
    - Cauchy’ego, 105
    - z alokacją, 109
  - procedura
    - BLAS, 314
    - obsługi, 266
  - proces, 202, 205, 206
    - nadrzędny, 239
    - nsdq, 267
  - procesor CPU, 16
  - procesy
    - robocze, 215, 324
    - szeregujące, 259
    - współbieżne, 243
  - profilowanie, 29, 42, 66
    - profilowanie dyfuzji, 109
    - wierszy, 111, 124
  - program, *Patrz* narzędzie
  - programowanie asynchroniczne, 176
  - programy
    - szeregowe, 176
    - współbieżne, 176
  - projekt
    - klastra, 254, 316
    - Micro Python, 288
    - MPI4PY, 222
    - narzędzia SoMA, 308
  - protokół TCP, 231
  - przechowywanie
    - typów, 275
    - typów podstawowych, 151
    - zbiorów tekstowych, 279
  - przegląd skompilowanego kodu, 155
  - przekazywanie
    - obiektu, 228, 229
    - współużytkowanych danych, 260
  - przełączanie kontekstu, 176
  - przenoszenie kodu, 35
  - przepustowość interfejsów, 23
  - przestój usługi, 253
  - przestrzenie nazw, 89
  - przeszukiwacz, 186
  - przeszukiwacz szeregowy, 179
  - przetwarzanie
    - klastrowe, 249
    - równoległe, 152, 196, 208, 314
    - szeregowe, 225
    - wyidealizowane, 23, 24
  - przewidywanie rozgałęzień, 112
  - przybliżanie liczby pi, 200–210, 262
  - przydziały pamięci, 121
  - przydzielanie dla list, 75
  - przyspieszenie
    - działania kodu, 132, 135, 196, 210
    - kodu asynchronicznego, 192
  - pseudokod, 106
  - publikator, 264
  - punkty skoku, 61
- ## R
- RAID, 254
  - RAM, Random Access Memory, 16
  - raport narzędzia memory\_profiler, 54–56
  - raportowanie, 317, 320
  - redukowanie mocy, 145
  - redundancja, 265
  - rekomendacje, 316
  - rozbicie
    - pętli while, 48
    - testów jednostkowych, 53
  - rozkład Gaussa, 290
  - rozproszone obliczenia, 266
  - rozwiązania klastrowe, 257
  - rozwijanie funkcji, 34
  - rozwijanie funkcji abs, 145
  - równanie dyfuzji, 104–107
  - równoważenie obciążenia, 211
- ## S
- sekwencyjne przechowywanie danych, 116
  - semafory synchronizujące, 198
  - serializacja, 219
  - serwis Lanyrd.com, 325
  - serwisowanie systemu SoMA, 309
  - skalowalny filtr Blooma, 297
  - skalowanie dynamiczne, 250
  - skrypt, *Patrz także* plik
    - coverage.py, 64
    - kernprof.py, 47–50, 109
    - setup.py, 140, 153
  - słownik, 79, 89

- słownik globals(), 89
- słowo kluczowe cdef, 143, 144
- sondowanie, 83
- sortowanie, 43, 72, 282
- sprawdzanie
  - danych wyjściowych, 57, 149
  - końca bajtowego, 60
  - współużytkowanych danych, 222
- stacja robocza, 16
- stała sys.maxint, 276
- sterta, 56
- strategie profilowania, 66
- struktura
  - drzewa trie, 283
  - grafu DAWG, 283
  - HyperLogLog++, 289
  - K-Minimum Values, 292, 294
  - Point, 168
- strumieniowanie danych, 313
- subskrybent, 264
- symbol >>, 61
- synchroniczny interpreter, 259
- synchronizacja, 198, 219
  - zapisów, 246
  - danych, 222
  - dostępu, 242
- system
  - Gearman, 269
  - komputerowy, 15
  - NSQ, 262–267
  - przetwarzający zadania, 269
  - przetwarzania danych, 322
  - Redis, 224, 229
  - SaltStack, 309
  - SoMA, 309
  - SQS, 269
  - wdrażania
    - Chef, 256
    - Fabric, 256
    - Puppet, 256
    - Salt, 256
- szereg nieskończony, 96
- szybkości połączeń interfejsów, 23
- szybkość zegara, 17

## Ś

- średnia online, 98
- środowisko
  - Canopy, 28
  - EPD, 28
  - Sage, 28
  - systemu NSQ, 267

## T

- tabela mieszająca, 82, 84
  - usuwanie wartości, 85
  - zmiana wielkości, 85
- tablica, 69
- tablica locals(), 69
- tablice
  - dynamiczne, 73, 74
  - statyczne, 73, 77
  - współużytkowane, 238
- technika głębokiego uczenia, 310
- testowanie szybkości, 62
- testy jednostkowe, 64–67
- tłumaczenie, 324
- tokeny, 280, 281
- topologia
  - połączeń, 265
  - systemu NSQ, 264
- TTL, Time to Live, 321
- twierdzenie Pitagorasa, 201
- tworzenie
  - adnotacji, 145
  - dwoch kolejek, 218
  - funkcji obrotu, 125
  - hipotezy, 42
  - lokalnego profilu, 261
  - modułu rozszerzenia, 148
  - norm wektora, 117
  - operacji wektorowych, 169
  - procesu szeregowego, 196
  - systemu klastrowego, 254
  - tabeli mieszającej, 82
  - tablicy, 70
- typ
  - array, 116
  - double complex, 144
  - Future, 178
  - int, 144
  - struct, 166, 168
  - unsigned int, 144
- typy podstawowe, 274

## U

- uczenie maszynowe, 315
- układy graficzne GPU, 162
- uruchamianie
  - interpretera PyPy, 159
  - modułu timeit, 39
  - narzędzia dowser, 59
  - serwera WWW, 59
  - skryptu, 140, 283

urządzenie typu SS, 19

usługa

AWS, 249

EC2, 254

Skype, 253

usuwanie elementu, 85

utrata danych, 256

użycie

adnotacji, 170

adnotacji kompilatora, 141

dekoratora, 38

dekoratora @profile, 64

drzew trie, 287

dwóch kolejek, 217, 219

filtru Blooma, 298

filtru laplace, 130

flagi przenośności, 40

funkcji %timeit, 62

funkcji set, 282

funkcji wbudowanych, 62

generatorów, 97

grafu DAWG, 284

iloczynu skalarnego, 118

interaktywnego debugera, 60

kodu Fortran, 169

kompilatora kodu C, 137

menedżera kontekstów, 55

menedżera kontekstu, 245

modułu cProfile, 41

modułu ctypes, 164

modułu dis, 60, 63

modułu IPython Parallel, 259

modułu lockfile, 244, 245

modułu mmap, 232, 233

modułu numexpr, 127

modułu Parallel Python, 257

narzędzia cffi, 167

narzędzia dowser, 58

narzędzia heapy, 57

narzędzia line\_profiler, 46

narzędzia memory\_profiler, 51

narzędzia numpy, 119, 209

narzędzia runsnake, 46

obiektu Lock, 246

obiektu Manager.Value, 228

obiektu RawValue, 232

procesów, 210

profilowania, 29

serwera Redis, 230

skryptu kernprof.py, 48

słownika, 80

struktury datnie, 286

systemu NSQ, 262

systemu Redis, 229

wątku, 220

wykonywania szeregowego, 202

## W

warstwy komunikacji, 21

wartości k-minimum, 291

wartościowanie leniwe generatora, 97

warunki brzegowe, 106

wąskie gardło, 29

wątki, 197, 202, 206–208

wdrażanie, 320

wdrażanie aktualizacji, 256

wektory, 103

wektoryzacja, 17, 119

weryfikowanie

liczb pierwszych, 221

optymalizacji, 129

wyniku, 238

wielowątkowość współbieżna, 18

wiersz poleceń, 39

wirtualny procesor, 18

wizualizacja

danych wyjściowych, 46

pliku profilowania, 47

w czasie rzeczywistym, 67

właściwość

length, 95

next(), 98

wskaznik, 112

wskaznik Major page faults, 41

współbieżne procesy, 243

współbieżność, 175

współczynnik błędu, 301

współprogramy, coroutine, 178

współprogramy greenlet, 181

współrzędne zespolone, 35

współużytkowanie

danych, 236, 260

tablicy, 239, 240

zadań, 197

wstawianie, 82

wstawianie z kolizjami, 84

wybór struktury danych, 73

wydajność

algorytmu, 72

instrukcji while, 145

kolejki zadań, 326

wyszukiwań, 87

wyjątek NameError, 64

wykonywanie szeregowo, 209

wykorzystanie pamięci, 237, 272, 276, 288

wykres zbioru Julii, 32, 37  
wykrywanie nieprawidłowości, 99  
wyłączanie wektoryzacji, 121  
wyodrębnianie danych sieciowych, 179, 183–185, 188  
wyszukiwanie, 80  
  binarne, 72  
  efektywne, 71  
  liniowe, 80  
  liniowe listy, 71  
  powolne, 91  
  w przestrzeniach nazw, 90  
  w słowniku, 83, 87  
wyświetlanie liczby instrukcji, 63  
wywołania zwrotne, 177, 186  
wywoływanie narzędzia `docker`, 59  
wzrosty szybkości, 134

## Z

zastosowanie, *Patrz* użycie  
zbiory, 79  
zbiór Julii, 31, 34, 138, 152  
zespolony warunek początkowy, 35  
zestawienie przyspieszeń, 132  
zewnątrzny system kolejek, 221  
zintegrowane środowisko programistyczne, IDE, 28  
złożoność, 62, 72, 80

zmiana  
  funkcji, 56  
  szybkości zegara, 17  
  wielkości listy, 76  
zmiennie globalne, 108  
zmniejszanie  
  liczby alokacji pamięci, 110–113  
  liczby przydziałów pamięci, 123  
znajdowanie  
  elementu, 85  
  liczb pierwszych, 211, 212  
  nieprawidłowości, 101  
  unikalnych imion, 81  
  wartości, 72  
zrównoważone obciążenie, 259  
zwiększanie wydajności, 145

## Ż

żądania współbieżne, 182  
żądany współczynnik błędu, 296





# PROGRAM PARTNERSKI

GRUPY WYDAWNICZEJ HELION

- 
1. ZAREJESTRUJ SIĘ
  2. PREZENTUJ KSIĄŻKI
  3. ZBIERAJ PROWIZJĘ

Zmień swoją stronę WWW  
w działający bankomat!

**Dowiedz się więcej i dołącz już dzisiaj!**

<http://program-partnerski.helion.pl>

GRUPA WYDAWNICZA

 **Helion SA**

# Python

## Programuj szybko i wydajnie



Python to skryptowy język programowania istniejący na rynku od wielu lat – jego pierwsza wersja pojawiła się w 1991 roku. Przejrzystość kodu źródłowego była jednym z głównych celów Guida van Rossuma, twórcy tego języka. Dziś Python cieszy się dużą popularnością, co z jednej strony świadczy o jego przydatności, a z drugiej gwarantuje użytkownikom szerokie wsparcie społeczności programistów języka. Python jest elastyczny, dopuszcza różne style programowania, a dzięki temu znajduje zastosowanie w wielu miejscach świata IT.

Jeżeli chcesz w pełni wykorzystać możliwości Pythona i tworzyć wydajne rozwiązania, koniecznie zaopatr się w tę książkę! Dzięki niej dowiesz się, jak użyć profilowania do lokalizowania „wąskich gardeł”, oraz poznasz efektywne techniki wyszukiwania danych na listach, w słownikach i zbiorach. Ponadto zdobędziesz wiedzę na temat obliczeń macierzowych i wektorowych oraz zobaczysz, jak kompilacja do postaci kodu C wpływa na wydajność Twojego rozwiązania. Osobne rozdziały zostały poświęcone współbieżności oraz modułowi multiprocessing. Opanowanie tych zagadnień pozwoli Ci ogromnie przyspieszyć działanie Twojej aplikacji. Na sam koniec nauczysz się tworzyć klastry i kolejki zadań oraz optymalizować zużycie pamięci RAM. Rozdział dwunasty to gratka dla wszystkich – zawiera najlepsze porady specjalistów z branży! Książka ta jest obowiązkową lekturą dla wszystkich programistów chcących tworzyć wydajne rozwiązania w języku Python.

### Dzięki tej książce:

- poznasz sposoby profilowania aplikacji
- zrozumiesz, jak działają listy, słowniki i zbiory
- zoptymalizujesz zużycie pamięci RAM
- poznasz porady ekspertów z branży IT

### Wyciśnij z Pythona siódme poty!

**Micha Gorelick** – zajmuje się problematyką uczenia się maszyn i wydajnymi strumieniami danych. Współzałożyciel firmy Fast Forward Labs.

**Ian Ozsvald** – analityk danych i nauczyciel w firmie ModelInsight, z 10-letnim doświadczeniem w programowaniu w języku Python. Prelegent na konferencjach PyCon oraz PyData.

<b>Helion</b>	
32028	numer katalogowy
księgarnia internetowa	
<a href="http://helion.pl">http://helion.pl</a>	
zamówienia telefoniczne	
	<b>0 801 339900</b>
	<b>0 601 339900</b>
Informatyka w najlepszym wydaniu	

Sprawdź najnowsze promocje:  
 1 <http://helion.pl/promocje>  
 Książki najchętniej czytane:  
 2 <http://helion.pl/bestsellery>  
 Zamów informacje o nowościach:  
 3 <http://helion.pl/nowosci>

**Helion SA**  
 ul. Kościuszki 1c, 44-100 Gliwice  
 tel.: 32 230 98 63  
 e-mail: [helion@helion.pl](mailto:helion@helion.pl)  
<http://helion.pl>



ISBN 978-83-283-0466-6
9 788328 130466
cena 59,00 zł