

Metaohjelmointi Python-kielellä

Mikko Koho

Seminaarityö

HELSINGIN YLIOPISTO

Tietojenkäsittelytieteen laitos

Helsinki, 6. joulukuuta 2014

Tiedekunta — Fakultet — Faculty		Laitos — Institution — Department	
Matemaattis-luonnontieteellinen		Tietojenkäsittelytieteen laitos	
Tekijä — Författare — Author			
Mikko Koho			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Metaohjelmointi Python-kielellä			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Tietojenkäsittelytiede			
Työn laji — Arbetets art — Level	Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages	
Seminaarityö	6. joulukuuta 2014	10	
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<div>Tiivistelmä.</div> <div>ACM Computing Classification System (CCS):</div>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
Python, metaohjelmointi			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Additional information			

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Python-ohjelmointikieli	1
2.1	Syntaksi	2
2.2	Muuttujat	2
2.3	Tietotyytit	3
2.4	Kehitelmät	3
2.5	Luokat ja oliot	4
3	Metaohjelmointi Pythonilla	5
3.1	Reflektio	6
3.2	Dynaamiset luokat	6
3.3	Koodin kääntäminen suoritusaikana	7
3.4	Tavukoodin tarkastelu ja muokkaus	7
3.5	Käännösaikainen metaohjelmointi	8
4	Yhteenveto	8
	Lähteet	9

1 Johdanto

Metaohjelmoinnilla tarkoitetaan klassisen määritelmän mukaan sellaisen tietokoneohjelman tekemistä, joka kirjoittaa uusia tietokoneohjelmia [HB12, s. 6]. Tämä on kuitenkin melko yksinkertaistettu määritelmä, eikä metaohjelmointia ole helppo määritellä tarkasti. Toinen yleinen määritelmä esittää metaohjelmoinnin olevan ”tietokoneohjelma, joka manipuloi toisia ohjelmia suoritusaikana” [HB12, s. 7].

Tärkeä osa metaohjelmointia on ohjelman suoritusaikainen tilansa tarkastelu ja muuntelu eli reflektio. Reflektioon kuuluu käsite introspektio, jolla tarkoitetaan suoritusajasta muistissa olevien olioiden tarkastelua [Pil04].

Tässä seminaarityössä tarkastellaan Python-ohjelmointikielen tarjoamia työkaluja metaohjelmointiin. Alussa käydään läpi Python-kielen perusteita, ja tämän jälkeen tutustutaan metaohjelmointiin Python-kielillä. Metaohjelmoinnista tarkastellaan lähinnä suoritusajasta metaohjelmointia.

2 Python-ohjelmointikieli

Ensimmäinen Python-kielen versio on julkaistu 1991. Pythonin suosio on kasvanut tasaisesti, ja se on nykyään käytetyin kieli ohjelmoinnin perusteiden opetukseen Yhdysvaltojen yliopistoissa [Guo14]. Python-kielistä on nykyään käytössä eri versioita. Python 2.7 on edelleen melko suosittu, vaikka versio 3 on julkaistu jo 2008. Versio 3 ei ole yhteensopiva aiempien versioiden kanssa. Python 3:n yleistymistä on hidastanut se, että jotkut suositut kirjastot ja sovelluskehikset käyttävät edelleen Python 2:ta eivätkä ole siirtyneet versioon 3.

Python-ohjelmakoodia voidaan kääntää useilla eri kääntäjillä [Mar06]. Käytetyin kääntäjä on CPython (Classic Python), joka kääntää alkupe-
räisen koodin Python-tavukoodiksi. Muita suosittuja kääntäjiä ovat Java-
tavukoodiksi kääntävä Jython sekä IronPython, joka kääntää Python-koodia
.NET-ympäristön käyttämäksi CIL-tavukoodiksi. PyPy on Python-kielillä
toteutettu useissa eri ympäristöissä toimiva suoraan konekielelle koodia
kääntävä suoritusaikainen (just-in-time) kääntäjä.

CPythonilla käännettyä tavukoodia voidaan ajaa C-kielillä toteutetulla

virtuaalikoneella [Mar06]. Pythonin standardikirjasto on toteutettu osittain C:llä ja osittain Pythonilla.

Seminaarityön esimerkit toimivat sekä Python 2.7:llä että Python 3:lla. Esimerkeissä ohjelman tulosteet on kirjoitettu kommenttiriveinä tulosteen tuottavan rivin jälkeen.

Tässä luvussa käydään läpi Python-kielen perusteita ja metaohjelmoinnin kannalta olennaisia asioita.

2.1 Syntaksi

Python ohjelma koostuu loogisista riveistä, jotka ovat yhden tai useamman fyysisen rivin mittaisia. [Mar06]. Loogisten rivien päättämiseen ei käytetä mitään merkkiä. Rivien sisennyksen perusteella erotetaan ohjelmakoodin lohkot toisistaan. Suositeltu tapa sisentää on käyttää ensimmäisen tason sisentämiseen 4 välilyöntiä ja seuraavaan 8 ja niin edelleen [VWC13].

Pythonissa on 30 avainsanaa (keyword), jotka ovat kielen varattuja sanoja. Näitä ovat esimerkiksi funktio `print` ja kielen rakenteissa käytetyt sanat kuten `if`, `and` ja `class`. Pythonin standardikirjasto koostuu sisäänrakennettujen funktioiden lisäksi kokoelmasta eri tarkoituksiin soveltuvia moduuleita (module), jotka pitää tarvittaessa tuoda erikseen osaksi suoritettavaa ohjelmaa komennolla `import`.

2.2 Muuttujat

Python on dynaamisesti tyyppitetty kieli. Muuttujien arvon tyyppiä ei tarvitse eksplisiittisesti määrittää, vaan tyyppi määräytyy sen perusteella min-käläinen arvo muuttujaan sijoitetaan. Muuttujan arvoa voidaan vaihtaa sijoittamalla siihen uusi arvo. Uuden arvon ei tarvitse olla saman tyyppinen kuin muuttujan vanha arvo, vaan muuttujan tyyppiä voidaan vaihtaa sijoittamalla siihen eri tyyppinen arvo. Listaus 1 sisältää yksinkertaisen esimerkin Python-kielen syntaksista. Rivillä 1 asetetaan muuttujan `a` arvoksi merkkijono `"Hello world!"`, joka tulostetaan rivillä 2. Rivillä 5 tulostetaan muuttujassa `a` olevan merkkijonon pituus.

```

1  a = 'Hello world!'
2  print(a)
3  # Hello world!
4
5  print(len(a))
6  # 12

```

Listaus 1: Yksinkertainen esimerkki Python-kielen syntaksista.

2.3 Tietotyypit

Pythonissa kaikki arvot, muuttujat ja funktiot ovat olioita. Olion tyyppi määrittää, mitä metodeja ja ominaisuuksia olio tarjoaa. Osa olioista on muuttumattomia (immutable) ja osa muutettavia (mutable). Python-kielessä ei ole erikseen vakioita, mutta käytäntönä on käyttää muuttujan nimessä pelkästään isoja kirjaimia, jos arvoa ei ole tarkoitus muuttaa.

Pythonin sisäänrakennettuja tietotyyppejä ovat muun muuassa numeeriset `int` (kokonaisluku) ja `float` (liukuluku), sekvenssityypit `list` (lista), `str` (merkkijono) ja `tuple` (monikko), joukko `set`, sanakirja `dict` sekä tiedosto `file`. Sanakirja-tyyppi tunnetaan joissain ohjelmointikielissä hajautustauluna. Hajautustaulu onkin ainakin CPythonin sisäinen toteutus sanakirjasta, mutta muitakin mahdollisia toteutustapoja on. Standardikirjastoon kuuluvista moduuleista löytyy lisää tietotyyppejä kuten aikatyyppi `datetime` ja taulukko `array`.

Sekvenssit ovat iteroitavia (iterable) olioita, eli ne kykenevät palauttamaan jäseniään yksi kerrallaan. Iteroitavia olioita ovat myös muut oliot, joissa on toteutettu jäseniä palauttava `__iter__` tai `__getitem__` -metodi. Iteroitavia olioita voidaan käyttää suoraan osana esimerkiksi `for`-toistolauseissa, kuten esimerkiksi lauseessa

```
for x in [1,2,3]: print(x)
```

2.4 Kehitelmät

Listakehitelmä (list comprehension) on matemaatiikan joukkojen määrittelyn merkintätavan pohjalta luotu syntaksi listan määrittelyyn olemassa olevien listojen pohjalta. Pythoniin on kehitetty myös listakehitelmän syntaksiin

perustuvat joukkokehitelmä (set comprehension) ja sanakirjakehitelmä (dictionary comprehension). Nämä kaikki kehitelmät ovat helppoja tapoja luoda lista-, joukko- tai sanakirjaolioita.

Esimerkkejä listakehitelmän käytöstä sekä joidenkin Python-kielen funktioiden käytöstä on listauksessa 2. Funktio `range` palauttaa Python 2:ssa listan ja Python 3:ssa generaattoriolion, jota voidaan käyttää listan tapaan. Funktio `all` tarkastaa kaikkien listan (tai muun iteroitavan olion) totuusarvon. Pythonissa kaikki sisäänrakennettujen tietotyyppien oliot voidaan evaluoida totuusarvoina, jolloin lukujen tapauksessa aina luku "0" evaluoituu epätodeksi ja muut luvut todeksi.

```
1 print(range(10))
2 # [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]
3
4 print( [x**2 for x in range(11)] )
5 # [0, 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100]
6
7 some_list = [1, 4, 7, 'foo', 12, 'bar']
8 print( [x for x in some_list if str(x).isalpha()] )
9 # ['foo', 'bar']
10
11 print( # Alkulukuja
12     [x for x in range(2, 50) if all([x % y for y in range(2, x-1)])]
13 )
14 # [2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47]
```

Listaus 2: Esimerkki listakehitelmistä ja funktion `range` käytöstä.

2.5 Luokat ja oliot

Python on olio-ohjelmointikieli, joka ei kuitenkaan pakota käyttämään olio-ohjelmointia ohjelmien toteutuksessa.

Pythonissa myös luokat ovat olioita. Luokilla on joitain piirteitä kuten muodostin (constructor) metodissa `__init__`, jotka mahdollistavat nii-

den käyttämisen luokkina. Luokka voi periä yhden tai useamman luokan. Luokka määritellään lausekkeella `class ClassName(InheritedClass, AnotherInherited)`. Python 2:ssa luokan tulisi periä ainakin `object`, jolloin se muodostaa niin sanotun uudentyyppisen luokan [Mar06]. Python 2.2:ssa luokkien rakenne muuttui ja uusi rakenne toteutettiin `object`-luokkaan, jota käytetään Python 3:ssa oletuksena. Uudentyyppisten luokkien *metaluokka* on aina `type` [Mar06]. Metaluokkaa käytetään muodostimena luotaessa uusi luokkaolio [Met14]. Metaluokkia voi määritellä itse, mutta tälle on harvoin tarvetta.

Kahdella alaviivalla metodin nimen alussa ja lopussa merkitään luokan ”maagisia” metodeita (magic methods) ja attribuutteja [Mar06], joilla on jokin erityinen käyttötarkoitus Pythonissa. Nämä metodit ja niiden toimintaa ja käyttöä on selitetty Pythonin dokumentaatiossa [Ket12]. Osa ”maagisista” metodeista on sellaisia, että Python generoi ne olion luomisen yhteydessä, jolloin ne sisältävät jotain metatietoa itse oliosta. Monet ”maagisista” metodeista ovat sellaisia, että niitä määrittelemällä tai muokkaamalla jo määriteltäviä voidaan vaikuttaa olion toimintaan ohjelmassa [Ket12]. Esimerkiksi muokkaamalla luokan `__cmp__(self, other)`-metodia, voidaan ylikirjoittaa kahden luokasta muodostetun olion suuruusvertailu omalla metodilla. Samoin aritmeettisille operaattoreille on kullekin omat ”maagiset” metodit.

Metaluokan metodeilla `__instancecheck__(self, instance)` ja `__subclasscheck__(self, subclass)` voidaan vaikuttaa siihen miten ajoaikainen reflektio käyttäytyy [Ket12, Pyt14]. Näistä ensimmäistä käytetään yliajamaan (override) Pythonin sisäänrakennetun funktion `isinstance` toimintaa, joka kertoo onko instanssi muodostettu tietyistä luokasta. Jälkimmäinen yliajaa sisäänrakennetun funktion `issubclass` toimintaa ja kertoo onko luokka toisen luokan aliluokka. Reflektion toiminnan muokkaamiselle on vaikea keksiä hyötykäyttöä, mutta se on mielenkiintoinen esimerkki Pythonin dynaamisuudesta.

3 Metaohjelmointi Pythonilla

Metaohjelmointi on Pythonilla hyvin luontevaa, koska olioita voidaan tutkailla ja yleensä muokata suoritusaikana vapaasti, ja niistä saadaan paljon

metatietoa Pythonin peruskirjaston työkaluilla.

3.1 Reflektio

Olion luokka saadaan kutsumalla `type`:ä niin, että parametrina on olio, jonka luokka halutaan selvittää [Pil04].

Funktio `dir` palauttaa listan olion attribuuteista, joihin kuuluu myös olion metodit. Funktio `getattr` ottaa parametrina merkkijonon ja palauttaa parametrin nimisen attribuutin. Tällöin voidaan esimerkiksi kutsua metodeja oliosta, jonka rakennetta ei tunnetta vielä käännösvaiheessa [Pil04]. Funktiolla `isinstance` voidaan tarkistaa, onko joku olio tietyn tyyppinen.

Olion lyhyen sanallisen kuvauksen saa suoritusaikana haettua sen `__doc__`-attribuutista. Kuvaus on koodissa oliolle annettu *docstring*-kuvailu, joka on Pythonissa tyypillinen tapa kuvailla tekstinä ohjelman komponentteja.

Olioita, luokkia ja funktioita voidaan muokata suoritusaikana melko vapaasti. Esimerkki peruskirjaston `dir` funktion korvaamisesta omalla funktiolla on listauksessa 3. Esimerkin oma funktio palauttaa sille annetut argumentit tekemättä niille mitään. Tämänkaltaisesta kirjastojen ja moduuleiden osien suoritusaikaisesta muokkaamisesta käytetään nimeä ”monkey patching”.

Pythonin standardikirjaston `inspect`-moduuli tarjoaa työkaluja olioiden tilan tutkimiseen ohjelman suoritusaikana. Moduuli `sys` tarjoaa työkaluja käytetyn Python-tulkin ja käyttöjärjestelmän tarkasteluun.

3.2 Dynaamiset luokat

Luokkia voidaan muokata ohjelman suoritusaikana, jolloin vaikutus ulottuu kaikkiin jo luotuihin luokan instansseihin. On myös mahdollista luoda uusia luokkia dynaamisesti ohjelman suoritusaikana `type`-metaluokan avulla [Met14]. Kutsumalla `type`:ä kolmella parametrilla saadaan paluuarvona luokka. Parametrit ovat järjestyksessä luokan nimi, perittävät luokat ja sanakirja-tyyppinen muuttuja luokan sisällöstä [Met14]. Esimerkiksi tyhjä luokka voidaan luoda dynaamisesti lausekkeella `C = type('C', (), {})`.

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2
3  import __builtin__
4
5  def x(*args):
6      return args
7
8  print(dir(__builtin__))
9  # ['ArithmeticError', 'AssertionError', 'AttributeError', ... ]
10
11 __builtin__.dir = x
12
13 print(dir(__builtin__))
14 # (<module '.__builtin__' (built-in)>,)

```

Listaus 3: Standardikirjaston funktion korvaaminen omalla funktiolla.

3.3 Koodin kääntäminen suoritusaikana

Pythonissa on sisäänrakennetut funktiot `compile`, `eval` ja `exec`, joiden avulla voidaan kääntää ja ajaa Python-koodia ohjelman suoritusaikana [Cro14, Mar06].

Esimerkki suoritusaikaisesta koodin kääntämisestä on listauksessa 4. Esi-merkin rivillä 1 luodaan muuttuja, joka sisältää käännettävän koodin merkki-
jonona. Rivillä 2 käännetään koodi merkkijonosta tavukoodiksi käyttämällä funktiota `compile`, jonka parametrit ovat käännettävä koodi, koodin sisältä-
vän tiedoston nimi ja käännöstila (mode). Nimenä käytetään merkkijonoa '`<string>`' tarkoittamaan, että koodia ei ole luettu tiedostosta. Käännöstila '`single`' kertoo, että käännetään yksi lause (statement). Rivi 4 tulostaa `code_obj` -muuttujan merkkijonoesityksen. Rivillä 7 suoritetaan tavukoodi muuttujasta `code_obj`.

3.4 Tavukoodin tarkastelu ja muokkaus

Standardikirjaston `dis`-moduulilla voidaan tutkia Python-tavukoodia. Lis-
tauksessa 5 on esimerkki tavukoodin tulostamisesta `dis`-moduulin `dis`-

```

1 code_str = 'print("Hello world!")'
2 code_obj = compile(code_str, '<string>', 'single')
3
4 print(code_obj)
5 # <code object <module> at 0x7f06341f2cb0, file "<string>", line 1>
6
7 exec(code_obj)
8 # Hello world!

```

Listaus 4: Esimerkki Python-lauseen kääntämisestä tavukoodiksi ohjelman suoritusaikana ja käännetyn koodin ajamisesta [Cro14].

metodilla sekä tulostettu tavukoodi. Tavukoodi on tulostettu Python 2:lla ja se on eri näköinen suoritettaessa esimerkki Python 3:lla.

Moduuli **parser** antaa rajapinnan Python-kääntäjän sisäiseen jäsennyspuuhun ja mahdollistaa sen muokkaamisen. Tämän moduulin lisäämisen jälkeen on kuitenkin standardikirjastoon lisätty **ast**-moduuli, joka mahdollistaa kääntäjän abstraktin syntaksipuun (abstract syntax tree) luomisen annetun ohjelmakoodin perusteella ja sen muokkaamisen. Funktiolle **compile** voidaan antaa parametrina muokatun AST-puun sisältävä **AST**-luokan olio ja kääntää se tavukoodiksi.

3.5 Käännösaikainen metaohjelmointi

Käännösaikaista metaohjelmointia ei ole suoraan tuettu Pythonissa. Mallien (template) käyttö käännösaikana on mahdollista esimerkiksi Jinja2:lla [Ron14].

Käännösaikainen metaohjelmointi on myös lisätty kahteen Pythonista jatkokehitettyyn kieleen, Mythoniin [Rie08] ja Convergeen [Tra05]. Mython-kieltä voidaan kääntää Python-tavukoodiksi, mutta Converge-kielestä käännettyä koodia suoritetaan kielen omalla virtuaalikoneella.

4 Yhteenveto

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2
3  import dis
4
5  def neliot(iteroitava):
6      '''Palauttaa listan parametrin alkioden neliöistä'''
7      return [x**2 for x in iteroitava]
8
9  dis.dis(neliot)
10 #  4          0 BUILD_LIST          0
11 #           3 LOAD_FAST            0 (iteroitava)
12 #           6 GET_ITER
13 #      >>    7 FOR_ITER            16 (to 26)
14 #           10 STORE_FAST          1 (x)
15 #           13 LOAD_FAST            1 (x)
16 #           16 LOAD_CONST           1 (2)
17 #           19 BINARY_POWER
18 #           20 LIST_APPEND          2
19 #           23 JUMP_ABSOLUTE        7
20 #      >>    26 RETURN_VALUE

```

Lista 5: Python-tavukoodin tarkastelu dis-moduulilla.

Lähteet

- [Cro14] Crosta, D.: *Exploring Python Code Objects*, 2014. <http://late.am/post/2012/03/26/exploring-python-code-objects> [17.11.2014].
- [Guo14] Guo, P.: *Python is Now the Most Popular Introductory Teaching Language at Top U.S. Universities*. Communications of The ACM Blog, heinäkuu 2014. <http://cacm.acm.org/blogs/blog-cacm/176450/fulltext> [06.11.2014].
- [HB12] Hazzard, K. ja Bock, J.: *Metaprogramming in .NET*. Manning Publications, 2012.

- [Ket12] Kettler, R.: *A Guide to Python's Magic Methods*, 2012. <http://www.rafekettler.com/magicmethods.html> [04.12.2014].
- [Mar06] Martelli, A.: *Python in a Nutshell*. O'Reilly Media, Inc., 2006.
- [Met14] *Metaprogramming – Python 3 Patterns, Recipes and Idioms*, 2014. <http://python-3-patterns-idioms-test.readthedocs.org/en/latest/Metaprogramming.html> [20.11.2014].
- [Pil04] Pilgrim, M.: *Dive Into Python*, toukokuu 2004. <http://www.diveintopython.net/> [06.11.2014].
- [Pyt14] *Python 2.7.8 documentation*, 2014. <https://docs.python.org/2/reference/index.html> [06.11.2014].
- [Rie08] Riehl, J.: *The Mython Programming Language*, 2008. <http://mython.org/> [16.11.2014].
- [Ron14] Ronacher, A.: *Jinja2 (The Python Template Engine)*, 2014. <http://jinja.pocoo.org/> [20.11.2014].
- [Tra05] Tratt, L.: *Compile-time meta-programming in a dynamically typed OO language*. Teoksessa *Proceedings Dynamic Languages Symposium*, sivut 49–64, October 2005.
- [VWC13] Van Rossum, G., Warsaw, B. ja Coghlan, N.: *PEP 8 – Style guide for python code*. 2013. <http://www.python.org/dev/peps/pep-0008> [11.11.2014].