
DTrace と SystemTap で CPython を測定する

リリース 3.9.21

Guido van Rossum
and the Python development team

12 月 09, 2024

目次

1	静的マーカーの有効化	2
2	静的 DTrace プローブ	3
3	静的 SystemTap マーカー	5
4	利用可能な静的マーカー	6
5	SystemTap Tapset	7
6	使用例	8

author David Malcolm

author Łukasz Langa

Dtrace と SystemTap はモニタリングツールで、コンピュータシステムのプロセスが何をしているかを調べる方法を提供します。どちらもドメイン固有言語 (domain-specific language) を使用して、次のことができるスクリプトをユーザが書けます:

- 観測対象のプロセスを絞り込む
- 関心のあるプロセスからデータを収集する
- 収集したデータからレポートを生成する

Python 3.6 では、CPython は ”プローブ” としても知られる ”マーカー” を埋め込んだビルドが行えます。マーカーは DTrace や SystemTap のスクリプトから観測でき、システムの CPython プロセスが何をしているかを観察するのが簡単になります。

CPython implementation detail: DTrace マーカーは CPython インタプリタの実装詳細です。CPython のバージョン間でプローブの互換性があるという保証はありません。CPython のバージョンを変えると、DTrace スクリプトは警告無しに動作しなくなったり、おかしい動作をする可能性があります。

1 静的マーカーの有効化

macOS には組み込みの DTrace サポートが備わっています。Linux では SystemTap 用のマーカーを埋め込んで CPython をビルドするためには、SystemTap 開発ツールをインストールしなければなりません。

Linux マシンでは、SystemTap 開発ツールのインストールは次のように行えます:

```
$ yum install systemtap-sdt-devel
```

もしくは:

```
$ sudo apt-get install systemtap-sdt-dev
```

次に CPython のビルドでは `--with-dtrace` を設定しなければなりません:

```
checking for --with-dtrace... yes
```

On macOS, you can list available DTrace probes by running a Python process in the background and listing all probes made available by the Python provider:

```
$ python3.6 -q &
$ sudo dtrace -l -P python$! # or: dtrace -l -m python3.6
```

ID	PROVIDER	MODULE	FUNCTION NAME
29564	python18035	python3.6	_PyEval_EvalFrameDefault function-entry
29565	python18035	python3.6	dtrace_function_entry function-entry
29566	python18035	python3.6	_PyEval_EvalFrameDefault function-return
29567	python18035	python3.6	dtrace_function_return function-return
29568	python18035	python3.6	collect gc-done
29569	python18035	python3.6	collect gc-start
29570	python18035	python3.6	_PyEval_EvalFrameDefault line
29571	python18035	python3.6	maybe_dtrace_line line

On Linux, you can verify if the SystemTap static markers are present in the built binary by seeing if it contains a ".note.stapsdt" section.

```
$ readelf -S ./python | grep .note.stapsdt
[30] .note.stapsdt      NOTE          0000000000000000 00308d78
```

Python を (`--enable-shared` を指定して) 共有ライブラリとしてビルドした場合は、代わりにその共有ライブラリの中を覗く必要があります。例えば次のようにします:

```
$ readelf -S libpython3.3dm.so.1.0 | grep .note.stapsdt
[29] .note.stapsdt      NOTE          0000000000000000 00365b68
```

十分に新しい readelf ではメタデータを出力できます:

```
$ readelf -n ./python

Displaying notes found at file offset 0x00000254 with length 0x00000020:
  Owner           Data size           Description
  GNU             0x00000010           NT_GNU_ABI_TAG (ABI version tag)
    OS: Linux, ABI: 2.6.32

Displaying notes found at file offset 0x00000274 with length 0x00000024:
  Owner           Data size           Description
  GNU             0x00000014           NT_GNU_BUILD_ID (unique build ID bitstring)
    Build ID: df924a2b08a7e89f6e11251d4602022977af2670

Displaying notes found at file offset 0x002d6c30 with length 0x00000144:
  Owner           Data size           Description
  stapsdt         0x00000031           NT_STAPSDT (SystemTap probe descriptors)
    Provider: python
    Name: gc__start
    Location: 0x00000000004371c3, Base: 0x0000000000630ce2, Semaphore: 0x00000000008d6bf6
    Arguments: -4@%ebx
  stapsdt         0x00000030           NT_STAPSDT (SystemTap probe descriptors)
    Provider: python
    Name: gc__done
    Location: 0x00000000004374e1, Base: 0x0000000000630ce2, Semaphore: 0x00000000008d6bf8
    Arguments: -8@%rax
  stapsdt         0x00000045           NT_STAPSDT (SystemTap probe descriptors)
    Provider: python
    Name: function__entry
    Location: 0x000000000053db6c, Base: 0x0000000000630ce2, Semaphore: 0x00000000008d6be8
    Arguments: 8@%rbp 8@%r12 -4@%eax
  stapsdt         0x00000046           NT_STAPSDT (SystemTap probe descriptors)
    Provider: python
    Name: function__return
    Location: 0x000000000053dba8, Base: 0x0000000000630ce2, Semaphore: 0x00000000008d6bea
    Arguments: 8@%rbp 8@%r12 -4@%eax
```

The above metadata contains information for SystemTap describing how it can patch strategically-placed machine code instructions to enable the tracing hooks used by a SystemTap script.

2 静的 DTrace プローブ

The following example DTrace script can be used to show the call/return hierarchy of a Python script, only tracing within the invocation of a function called "start". In other words, import-time function invocations are not going to be listed:

```
self int indent;

python$target:::function-entry
/copyinstr(arg1) == "start"/
```

(次のページに続く)

```

{
    self->trace = 1;
}

python$target:::function-entry
/self->trace/
{
    printf("%d\t%s:", timestamp, 15, probename);
    printf("%s", self->indent, "");
    printf("%s:%s:%d\n", basename(copyinstr(arg0)), copyinstr(arg1), arg2);
    self->indent++;
}

python$target:::function-return
/self->trace/
{
    self->indent--;
    printf("%d\t%s:", timestamp, 15, probename);
    printf("%s", self->indent, "");
    printf("%s:%s:%d\n", basename(copyinstr(arg0)), copyinstr(arg1), arg2);
}

python$target:::function-return
/copyinstr(arg1) == "start"/
{
    self->trace = 0;
}

```

この例は次のように実行できます:

```
$ sudo dtrace -q -s call_stack.d -c "python3.6 script.py"
```

出力は次のようになります:

```

156641360502280  function-entry:call_stack.py:start:23
156641360518804  function-entry: call_stack.py:function_1:1
156641360532797  function-entry:  call_stack.py:function_3:9
156641360546807  function-return: call_stack.py:function_3:10
156641360563367  function-return: call_stack.py:function_1:2
156641360578365  function-entry: call_stack.py:function_2:5
156641360591757  function-entry:  call_stack.py:function_1:1
156641360605556  function-entry:  call_stack.py:function_3:9
156641360617482  function-return: call_stack.py:function_3:10
156641360629814  function-return: call_stack.py:function_1:2
156641360642285  function-return: call_stack.py:function_2:6
156641360656770  function-entry: call_stack.py:function_3:9
156641360669707  function-return: call_stack.py:function_3:10
156641360687853  function-entry: call_stack.py:function_4:13
156641360700719  function-return: call_stack.py:function_4:14
156641360719640  function-entry: call_stack.py:function_5:18
156641360732567  function-return: call_stack.py:function_5:21

```

```
156641360747370 function-return:call_stack.py:start:28
```

3 静的 SystemTap マーカー

The low-level way to use the SystemTap integration is to use the static markers directly. This requires you to explicitly state the binary file containing them.

例えば、この SystemTap スクリプトは Python の呼び出し/返却 (call/return) 階層を表示するのに使えます:

```
probe process("python").mark("function__entry") {
    filename = user_string($arg1);
    funcname = user_string($arg2);
    lineno = $arg3;

    printf("%s => %s in %s:%d\\n",
           thread_indent(1), funcname, filename, lineno);
}

probe process("python").mark("function__return") {
    filename = user_string($arg1);
    funcname = user_string($arg2);
    lineno = $arg3;

    printf("%s <= %s in %s:%d\\n",
           thread_indent(-1), funcname, filename, lineno);
}
```

この例は次のように実行できます:

```
$ stap \
  show-call-hierarchy.stp \
  -c "./python test.py"
```

出力はこのようになります:

```
11408 python(8274):      => __contains__ in Lib/_abcoll.py:362
11414 python(8274):      => __getitem__ in Lib/os.py:425
11418 python(8274):      => encode in Lib/os.py:490
11424 python(8274):      <= encode in Lib/os.py:493
11428 python(8274):      <= __getitem__ in Lib/os.py:426
11433 python(8274):      <= __contains__ in Lib/_abcoll.py:366
```

それぞれの列の内容は次の通りです:

- スクリプトを起動してからのマイクロ秒単位の時間
- 実行可能ファイルの名前
- プロセスの PID

そして、残りの部分はスクリプトが実行していた呼び出し/返却階層を表示しています。

For a *--enable-shared* build of CPython, the markers are contained within the libpython shared library, and the probe's dotted path needs to reflect this. For example, this line from the above example:

```
probe process("python").mark("function__entry") {
```

should instead read:

```
probe process("python").library("libpython3.6dm.so.1.0").mark("function__entry") {
```

(CPython 3.6 のデバッグビルドと仮定しています)

4 利用可能な静的マーカー

function__entry(str filename, str funcname, int lineno)

このマーカーは Python の関数の実行が開始されたことを示しています。このマーカーは、ピュア Python (バイトコード) の関数でしか起動されません。

トレーススクリプトには位置引数として、ファイル名、関数名、行番号が渡され、必ず \$arg1, \$arg2, \$arg3 で渡されます:

- \$arg1: (const char *) ファイル名、user_string(\$arg1) でアクセスできます
- \$arg2: (const char *) 関数名、user_string(\$arg2) でアクセスできます
- \$arg3: int 行番号

function__return(str filename, str funcname, int lineno)

このマーカーは function__entry() の反対で、Python 関数の実行が (return もしくは例外によって) 終了したことを示しています。このマーカーは、ピュア Python (バイトコード) の関数でしか起動されません。

引数は function__entry() と同じです。

line(str filename, str funcname, int lineno)

このマーカーは、これから実行される Python の行を示しています。これは Python プロファイラによる行ごとのトレースと同等です。このマーカーは C 関数の内部では起動されません。

引数は function__entry() と同じです。

gc__start(int generation)

Python インタプリタによる循環参照のガベージコレクションが開始されたときに発火します。gc.collect() と同じように arg0 は走査する対象の世代です。

gc__done(long collected)

Python インタプリタによる循環参照のガベージコレクションが完了したときに発火します。arg0 は回収したオブジェクトの数です。

import__find__load__start(str modulename)

Fires before `importlib` attempts to find and load the module. `arg0` is the module name.

バージョン 3.7 で追加.

import__find__load__done(str modulename, int found)

Fires after `importlib`'s `find__and__load` function is called. `arg0` is the module name, `arg1` indicates if module was successfully loaded.

バージョン 3.7 で追加.

audit(str event, void *tuple)

Fires when `sys.audit()` or `PySys_Audit()` is called. `arg0` is the event name as C string, `arg1` is a PyObject pointer to a tuple object.

バージョン 3.8 で追加.

5 SystemTap Tapset

The higher-level way to use the SystemTap integration is to use a "tapset": SystemTap's equivalent of a library, which hides some of the lower-level details of the static markers.

Here is a tapset file, based on a non-shared build of CPython:

```
/*
   Provide a higher-level wrapping around the function__entry and
   function__return markers:
 */
probe python.function.entry = process("python").mark("function__entry")
{
    filename = user_string($arg1);
    funcname = user_string($arg2);
    lineno = $arg3;
    frameptr = $arg4
}
probe python.function.return = process("python").mark("function__return")
{
    filename = user_string($arg1);
    funcname = user_string($arg2);
    lineno = $arg3;
    frameptr = $arg4
}
```

If this file is installed in SystemTap's tapset directory (e.g. `/usr/share/systemtap/tapset`), then these additional probepoints become available:

python.function.entry(str filename, str funcname, int lineno, frameptr)

This probe point indicates that execution of a Python function has begun. It is only triggered for pure-Python (bytecode) functions.

```
python.function.return(str filename, str funcname, int lineno, frameptr)
```

This probe point is the converse of `python.function.return`, and indicates that execution of a Python function has ended (either via `return`, or via an exception). It is only triggered for pure-Python (bytecode) functions.

6 使用例

This SystemTap script uses the tapset above to more cleanly implement the example given above of tracing the Python function-call hierarchy, without needing to directly name the static markers:

```
probe python.function.entry
{
    printf("%s => %s in %s:%d\n",
           thread_indent(1), funcname, filename, lineno);
}

probe python.function.return
{
    printf("%s <= %s in %s:%d\n",
           thread_indent(-1), funcname, filename, lineno);
}
```

The following script uses the tapset above to provide a top-like view of all running CPython code, showing the top 20 most frequently-entered bytecode frames, each second, across the whole system:

```
global fn_calls;

probe python.function.entry
{
    fn_calls[pid(), filename, funcname, lineno] += 1;
}

probe timer.ms(1000) {
    printf("\033[2J\033[1;1H") /* clear screen */
    printf("%6s %80s %6s %30s %6s\n",
           "PID", "FILENAME", "LINE", "FUNCTION", "CALLS")
    foreach ([pid, filename, funcname, lineno] in fn_calls- limit 20) {
        printf("%6d %80s %6d %30s %6d\n",
               pid, filename, lineno, funcname,
               fn_calls[pid, filename, funcname, lineno]);
    }
    delete fn_calls;
}
```