

修士(工学)学位論文
Master's Thesis of Engineering

Gears OS のモジュール化と並列 API

2019 年 3 月

March 2019

宮城 光希

Mitsuki MIYAGI



琉球大学

大学院理工学研究科

情報工学専攻

Information Engineering Course
Graduate School of Engineering and Science
University of the Ryukyus

指導教員：教授 和田 知久

Supervisor: Prof. Tomohisa WADA

本論文は、修士(工学)の学位論文として適切であると認める。

論 文 審 査 会

印

(主 査) 和田 知久

印

(副 査) 名嘉村 盛和

印

(副 査) 長田 智和

印

(副 査) 河野 真治

要旨

現代の OS では拡張性と信頼性を両立させることが要求されている。信頼性をノーマルレベルの計算に対して保証し、拡張性をメタレベルの計算で実現することを目標に Gears OS を設計中である。

Gears OS は Continuation based C (CbC) によってアプリケーションと OS そのものを記述する。OS の下ではプログラムの記述は通常の実処理の他に、メモリ管理、スレッドの待ち合わせやネットワークの管理、エラーハンドリング等の記述しなければならない処理が存在する。これらの計算をメタ計算と呼ぶ。メタ計算を通常の実処理から切り離して記述するために、Code Gear、Data Gear という単位を提案している。CbC はこの Code Gear と Data Gear の単位でプログラムを記述する。

システムやアプリケーションを記述するために Code Gear と Data Gear を柔軟に再利用する必要がある。このときに機能を接続する API と実装の分離が可能であることが望ましい。Gears OS の信頼性を保証するために、形式化されたモジュールシステムを提供する必要がある。

本論文では、Interface を用いたモジュールシステムの説明と、ハードウェア上でメタレベルの実処理、および並列実行を可能とするために、Raspberry Pi 上での Gears OS の実装についての考察も行う。

Abstract

研究関連業績

1. 宮城光希, 河野真治. Code Gear と Data Gear を持つ Gears OS の設計. 第 59 回プログラミング・シンポジウム, Jan, 2018
2. 宮城光希, 桃原 優, 河野真治. GearsOS のモジュール化と並列 API. 情報処理学会システムソフトウェアとオペレーティング・システム研究会 (OS), May, 2018
3. 宮城光希, 河野真治. 継続を中心とした言語 Gears OS のデモンストレーション. 第 60 回プログラミング・シンポジウム, Jan, 2019

目次

研究関連論文業績	iii
第 1 章 オペレーティングシステム	6
第 2 章 OS の拡張性と信頼性の両立	7
第 3 章 Gears におけるメタ計算	10
3.1 Continuation based C	10
3.2 Code Gear	11
3.3 Data Gear	12
3.4 Meta Code Gear、Meta Data Gear	13
第 4 章 Gears OS の構成	16
4.1 Context	17
4.2 TaskManager	19
4.3 TaskQueue	20
4.4 Workers	20
第 5 章 Interface	21
5.1 Interface の定義	22
5.2 Interface の実装	22
第 6 章 コードの自動生成	24
6.1 Meta Code Gear の生成	24
6.2 Context の生成	26
第 7 章 xv6 の CbC への書き換え	27
7.1 xv6 の構成要素	27
7.1.1 システムコール	27
7.1.2 プロセス	28
7.1.3 ファイルディスクリプタ	29

7.1.4	ファイルシステム	29
7.2	xv6-rpi の CbC 対応	29
7.3	システムコールの書き換え	29
第 8 章	結論	30
	謝辞	31
	参考文献	33
	付録	34

目 次

2.1	証明とモデル検査による OS の検証	7
2.2	Gears のメタ計算	9
3.1	goto による code gear 間の継続	11
3.2	CodeGear と DataGear	12
3.3	ノーマルレベルの Code Gear の継続	13
3.4	メタレベルの Code Gear の継続	13
3.5	Context が持つ Data Gear へのアクセス	14
4.1	Gears OS の構成図	16
6.1	generate_context による Context の生成	26

表 目 次

ソースコード目次

3.1	code segment の軽量継続	11
3.2	Gears での Stack pop	12
4.1	Context	17
4.2	enum で定義された Code Gear の番号	18
4.3	Context の初期化	19
4.4	enum で定義された Data Gear の番号	19
4.5	TaskManager の Interface	19
5.1	pushSingleLinkedStack	21
5.2	Stack の Interface	22
5.3	SingleLinkedStack の実装	23
6.1	Stack pop の変換	25
6.2	マクロを用いない stub Code Gear	25
7.1	xv6 のシステムコールのリスト	28

第1章 オペレーティングシステム

コンピュータには CPU、ディスプレイ、キーボードやマウス、ハードディスクなど様々な機器が接続されている。プログラムの処理を行うとき、これらの様々なデバイスのアクセスや資源管理は複雑で容易ではない。異なるハードウェアを扱う際にはそれぞれに対応したプログラミングを行う必要がある。OS とはこれらのデバイスの抽象化や資源管理を行う。

ユーザーは OS のおかげで異なるハードウェアの違いを意識することなくプログラミングをすることができる。例えば同じプログラムで、異なる入力デバイスによる操作や、ディスプレイでの表示などは、デバイスへのアクセスなどの複雑な処理を OS が隠すことによってユーザーが意識せずにプログラミングを行える。

CPU、メモリ、ディスク、などの本来ユーザーが意識しなければならない資源も、OS が資源管理を行うことで意識することなくプログラミングすることができる。

1950 年代におけるコンピューターがプログラムを実行するには専門のオペレーターが存在し、オペレーターがジョブの管理、コンパイラの選択などを行っていた。しかし後に、ジョブの自動実行、やコンパイラのロードを行うプログラムができた。これが OS の祖先である。コンピュータには科学技術用のコンピューターと商用のコンピューターが開発されていたが、後に汎用コンピューターである System/360 が開発される。System/360 の OS/360 は強力なソフトウェア互換を持っていた。ソフトウェア互換により全てのソフトウェアが全てのマシンで動作するようになった。この頃の OS には、スプーリングやタイムシェアリングといった機能も導入されるようになった。その後、UNIX が開発され後に様々なバージョンが開発され、System V、BSD といった派生 OS なども開発され、現在に至る。

第2章 OS の拡張性と信頼性の両立

さまざまなコンピュータの信頼性の基本はメモリなどの資源管理を行う OS である。OS の信頼性を保証する事自体が難しいが、時代とともに進歩するハードウェア、サービスに対応して OS 自体が拡張される必要がある。OS は非決定的な実行を持ち、その信頼性を保証するには、従来のテストとデバッグでは不十分であり、テストしきれない部分が残ってしまう。これに対処するためには、証明を用いる方法とプログラムの可能な実行をすべて数え上げるモデル検査を用いる方法がある。モデル検査は無限の状態ではなくても巨大な状態を調べることになり、状態を有限に制限したり状態を抽象化したりする方法が用いられている。(図 2.1)

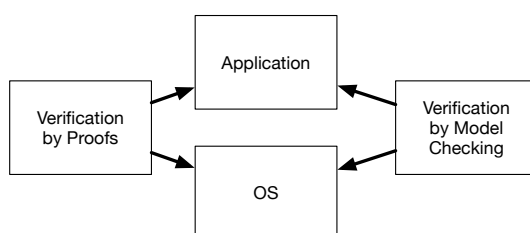


図 2.1: 証明とモデル検査による OS の検証

証明やモデル検査を用いて OS を検証する方法はさまざまなものが検討されている。検証は一度ですむものではなく、アプリケーションやサービス、デバイスが新しくなることに検証をやり直す必要がある。つまり信頼性と拡張性を両立させることが重要である。

コンピュータの計算はプログラミング言語で記述されるが、その言語の実行は操作的意味論の定義などで規定される。プログラミング言語で記述される部分をノーマルレベルの計算と呼ぶ。実際にコードが実行される時には、処理系の詳細や使用する資源、あるいは、コードの仕様や型などの言語以外の部分が服属する。これをメタレベルの計算という。この二つのレベルを同じ言語で記述できるようにして、ノーマルレベルの計算の信頼性をメタレベルから保証できるようにしたい。ノーマルレベルでの正当性を保証しつつ、新しく付け加えられたデバイスやプログラムを含む正当性を検証したい。

ノーマルレベルとメタレベルを共通して表現できる言語として Continuation based C(以下 CbC)[?] を用いる。CbC は関数呼出時の暗黙の環境 (Environment) を使わずに、コー

ドの単位を行き来できる引数付き goto 文 (parameterized goto) を持つ C と互換性のある言語である。これを用いて、Code Gear と Data Gear、さらにそのメタ構造を導入する。これらを用いて、検証された Gears OS を構築したい。図 2.2。

本論文では、Gears OS の要素である Code Gear、Data Gear、そして、Meta Code Gear、Meta Data Gear の構成を示す。これらは、CbC に変換されて実行される。Gears OS は、Task Scheduler を CPU や GPU 毎に持ち、一つの Task に対応する Context という Meta Data Gear を使用しながら計算を実行する。

Meta Gear を入れかえることにより、ノーマルレベルの Gear をモデル検査することができるようにしたい。ノーマルレベルでの Code Gear と Data Gear は継続を基本とした関数型プログラミング的な記述に対応する。この記述を定理証明支援系である Agda を用いて直接に証明できるようにしたい。Gears OS の記述はそのまま Agda に落ちる。Code Gear、Data Gear を用いた言語である CbC で記述することによって検証された OS を実装することができる。

従来の研究でメタ計算を用いる場合は、関数型言語では Monad を用いる [?]。これは Hakell では実行時の環境を記述する構文として使われている。OS の研究では、メタ計算の記述に型つきアセンブラ (Typed Assembler) を用いることがある [1]。Python や Haskell による記述をノーマルレベルとして採用した OS の検証の研究もある [2, 3]。SMIT などのモデル検査を OS の検証に用いた例もある [4]。

本研究で用いる Meta Gear は制限された Monad に相当し、型つきアセンブラよりは大きな表現単位を提供する。Haskell などの関数型プログラミング言語では実行環境が複雑であり、実行時の資源使用を明確にすることができない。CbC はスタック上に隠された環境を持たないので、メタレベルで使用する資源を明確にできるという利点がある。ただし、Gear のプログラミングスタイルは、従来の関数呼出を中心としたものとはかなり異なる。

また、本研究では Gears の記述をモジュール化するために Interface を導入した。さらに並列処理の記述用に par goto 構文を導入する。これらの機能は Agda 上で継続を用いた関数型プログラムに対応するようになっている。

本研究では Gears OS のモジュール化の仕組みである Interface を用いた Gears OS の構築を行った。

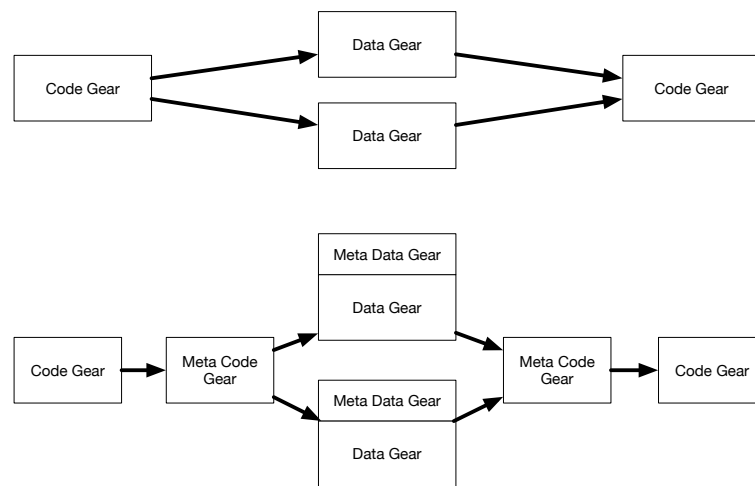


図 2.2: Gears のメタ計算

第3章 Gears におけるメタ計算

プログラムを記述する際、ノーマルレベルの処理の他に、メモリ管理、スレッド管理、CPU や GPU の資源管理等、記述しなければならない処理が存在する。これらの計算をメタ計算と呼ぶ。

従来の OS では、メタ計算はシステムコールやライブラリーコールの単位で行われる。実行時にメタ計算の変更を行う場合には、OS 内部のパラメータの変更を使用し、実行されるユーザープログラム自体への変更は限定的である。しかし、メタ計算は性能測定あるいはプログラム検証、さらに並列分散計算のチューニングなど細かい処理が必要で実際のシステムコール単位では不十分である。例えば、モデル検査ではアセンブラあるいはバイトコード、インタプリタレベルでのメタ計算が必要になる。しかし、バイトコードレベルでは粒度が細かすぎて扱いが困難になっている。具体的にはメタ計算の実行時間が大きくなってしまう。

メタ計算を通常の計算から切り離して記述するためには処理を細かく分割する必要がある。しかし、関数やクラスなどの単位は容易に分割できない。そこで当研究室ではメタ計算を柔軟に記述するためのプログラミング言語の単位として Code Gear、Data Gear という単位を提案している。プログラムの処理の単位を Code Gear、データの単位を Data Gear と呼ぶ。これによりシステムコードよりも細かくバイトコードよりも大きなメタ計算の単位を提供できる。

Code Gear、Data Gear にはそれぞれメタレベルの単位である Meta Code Gear、Meta Data Gear が存在し、これらを用いてメタ計算を実現する。

Gears OS は処理やデータの構造が Code Gear、Data Gear に閉じているため、これにより実行時間、メモリ使用量などを予測可能なものにすることが可能になる。

3.1 Continuation based C

CbC は処理を Code Gear とした単位を用いて記述するプログラミング言語である。Code Gear 間では軽量継続 (goto 文) による遷移を行うので、継続前の Code Gear に戻ることはなく、状態遷移ベースのプログラミングに適している。図 3.1 は Code Gear 間の処理の流れを表している。

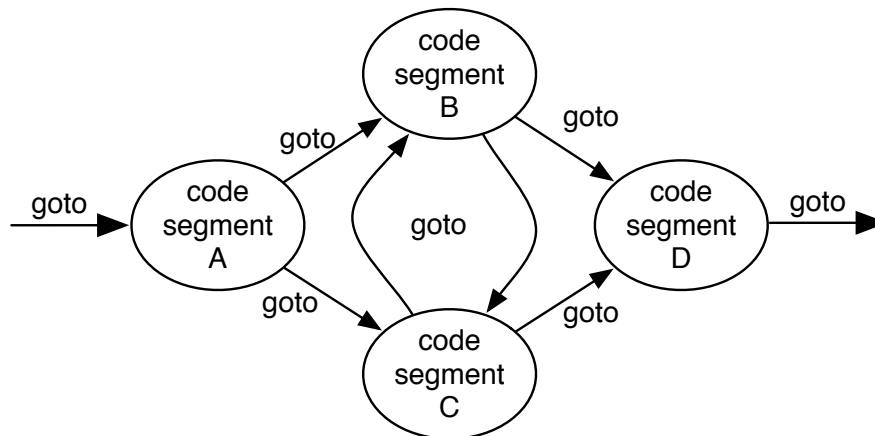


図 3.1: goto による code gear 間の継続

CbC は LLVM[5] と GCC[?] 上で実装されている。Gears OS はこの CbC を用いて記述されている。

3.2 Code Gear

Code Gear は CbC における最も基本的な処理単位である。関数に比べて細かく分割されているのでメタ計算をより柔軟に記述できる。ソースコード 3.1 は CbC における Code Gear の一例である。

ソースコード 3.1: code segment の軽量継続

```

1 __code cs0(int a, int b){
2   goto cs1(a+b);
3 }
4
5 __code cs1(int c){
6   goto cs2(c);
7 }

```

Code Gear は `__code` Code Gear 名 (引数) の形で記述される。Code Gear は戻り値を持たないので、関数とは異なり `return` 文は存在しない。次の Code Gear への遷移は `goto` Code Gear 名 (引数) で次の Code Gear への遷移を記述する。ソースコード 3.1 での `goto cs1(a+b);` がこれにあたる。この `goto` の行き先を継続と呼び、このときの `a+b` が次の Code Gear への出力となる。Scheme の継続と異なり CbC には呼び出し元の環境がないので、この継続は単なる行き先である。したがってこれを軽量継続と呼ぶこともある。cs1

へ継続した後は cs0 へ戻ることはない。軽量継続により、並列化、ループ制御、関数コールとスタックの操作を意識した最適化がソースコードレベルで行えるようにする。

CbC は軽量継続による遷移を行うので、継続前の Code Gear に戻ることはなく、状態遷移ベースのプログラミングに適している。

3.3 Data Gear

Data Gear は Gears OS におけるデータの単位である。Gears OS では Code Gear は Input Data Gear、Output Data Gear を引数に持ち、任意の Input Data Gear を参照し、Output Data Gear を書き出す。図 3.2 Code Gear はこのとき渡された引数の Data Gear 以外を参照することはない。この Data Gear の対応から依存関係の解決を行う。

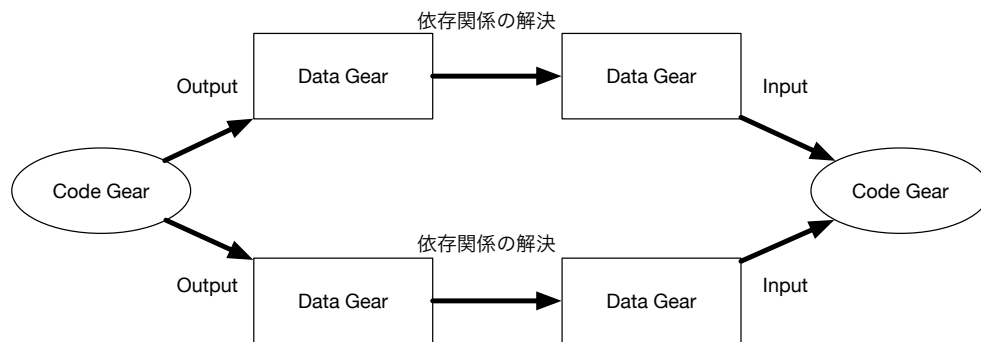


図 3.2: CodeGear と DataGear

ソースコード 3.2 は Gears OS での Stack の pop 操作の Code Gear の例である。popSingleLinkedListStack での引数 stack が Input Data Gear、next は継続先の Code Gear のアドレス、next の引数の data が Output Data Gear、... は可変長引数であることを示している。Input Data Gear で受け取った Stack に対して pop の操作を行った後に、取り出したデータを Output Data Gear として書き出し、goto next で引数で受けた次の Code Gear へと継続する。

ソースコード 3.2: Gears での Stack pop

```

1  |
2  | __code stackTest3(struct Stack* stack) {
3  |     goto stack->pop(assert3);
4  | }
5  |
6  | __code popSingleLinkedListStack(struct SingleLinkedList* stack, __code next(
7  |     union Data* data, ...)) {
   |     if (stack->top) {

```

```

8 |         data = stack->top->data;
9 |         stack->top = stack->top->next;
10 |     } else {
11 |         data = NULL;
12 |     }
13 |     goto next(data, ...);
14 | }
15 |
16 | __code assert3(struct Node* node, struct Stack* stack) {
17 |     assert(node->color == Red);
18 |     goto exit_code(0);
19 | }

```

3.4 Meta Code Gear、Meta Data Gear

Gears OS ではメタ計算を Meta Code Gear、Meta Data Gear で表現する。CbC での記述はメタ計算を含まないノーマルレベルでの記述と、Code Gear、Data Gear の記述を含むメタレベルの記述の 2 種類がある。メタレベルでもさらに、メタ計算を用いることが可能になっている。この 2 つのレベルはプログラミング言語レベルでの変換として実現される。メタレベルでの変換系は本論文では、Perl による変換スクリプトにより実装されている。

Meta Code Gear は通常の Code Gear の直前、直後に遷移され、メタ計算を実行する。Code Gear はノーマルレベルでは図 3.3 のように見える。メタレベルでは Code Gear は図 3.4 のように継続を行なっている。

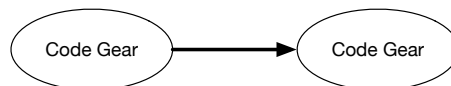


図 3.3: ノーマルレベルの Code Gear の継続

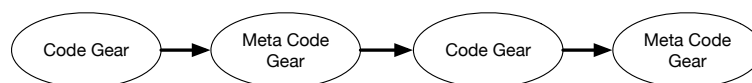


図 3.4: メタレベルの Code Gear の継続

Gears OS では Context と呼ばれる、使用されるすべての Code Gear、Data Gear を持つ Meta Data Gear を持っている。Gears OS は必要な Code Gear、Data Gear を参照したい場合、この Context を通す必要がある。しかし Context を通常の計算から直接扱う

のはセキュリティ上好ましくない。そこで Context から必要なデータを取り出して Code Gear に接続する Meta Code Gear を定義し、これを介して間接的に必要な Data Gear にアクセスする。この Meta Code Gear を stub Code Gear と呼ぶ。stub Code Gear は Code Gear 毎にあり、次の Code Gear へと継続する前に挿入される。つまり goto による継続を行うと、実際には次の Code Gear の stub Code Gear を呼び出す。stub Code Gear では、継続先が求める Input Code Gear、Output Code Gear を Context から参照している。

図 3.5 はメタレベルで見た Data Gear へのアクセスを図示したものである。メタレベルでは Code Gear は Context が持つ Data Gear へのポインタを渡されており、そこへ Output を行う。stub Code Gear は Meta Data Gear である Context が持つ Data Gear を、Input Data Gear、Output Data Gear として参照し、継続先のノーマルレベルの Code Gear へと遷移する。

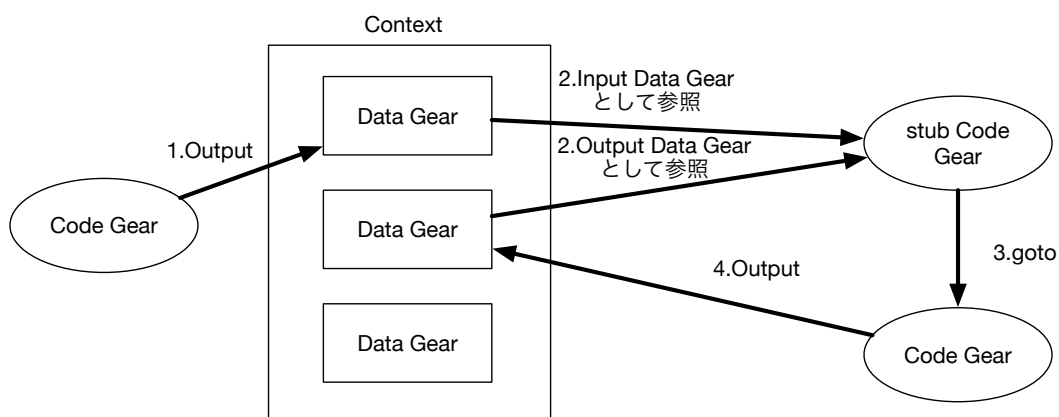


図 3.5: Context が持つ Data Gear へのアクセス

Code Gear と Data Gear は Interface と呼ばれるまとまりとして記述される。Interface は使用される全ての Data Gear の定義と、それに対する操作を行う Code Gear の集合である。Interface 作成時に Code Gear の集合を指定することにより複数の実装を持つことができる。Interface の操作に対応する Code Gear の引数は Interface に定義されている Data Gear を通して指定される。一つの実行スレッド内で使われる Interface の Code Gear と Data Gear は Context に格納される。

Code Gear の継続は関数型プログラミングからみると継続先の Context を含む Closure となっている。これを記述するために継続に不定長引数を追加する構文をスクリプトの変換機能として用意した。メタ計算側ではこれらの Context を常に持ち歩いているので goto 文で引数を用いることはなく、行き先は Code Gear の番号のみで指定される。

これにより Interface 間の呼び出しを C++ のメソッド呼び出しのように記述すること

ができる。Interface の実装は、Context 内に格納されているので、オブジェクトごとに実装を変える多様性を実現できている。

Context を複製して複数の CPU に割り当てることにより並列実行を可能になる。これによりメタ計算として並列処理を記述したことになる。Gears のスレッド生成は Agda の関数型プログラミングに対応して行われるのが望ましい。そこで、par goto 構文を導入し、Agda の継続呼び出しに対応させることにした。par goto では Context の複製、入力の同期、タスクスケジューラーへの Context の登録などが行われる。par goto 文の継続として、スレッドの join に相当する `_exit` を用意した。`_exit` により par goto で分岐した Code Gear の出力を元のスレッドで受け取ることができる。

関数型プログラムではメモリ管理は GC などを通して暗黙に行われる。Gears OS ではメモリ管理は stub などのメタ計算部分で処理される。例えば、寿命の短いスレッドでは使い捨ての線形アロケーションを用いる。

第4章 Gears OS の構成

Gears OS は Code Gear、Data Gear の単位を用いて開発されており、CbC で記述されている。Gears OS は Context と呼ばれる使用されるすべての Code Gear、Data Gear 持っている Meta Data Gear を持つ。Gears OS は継続の際この Context を常に持ち歩き、必要な Code Gear、Data Gear を参照したい場合、この Context を通して参照する。

Gears OS は以下の要素で構成される。

- ・ Context
- ・ TaskManager
- ・ TaskQueue
- ・ Workers

図 4.1 に Gears OS の構成図を示す。

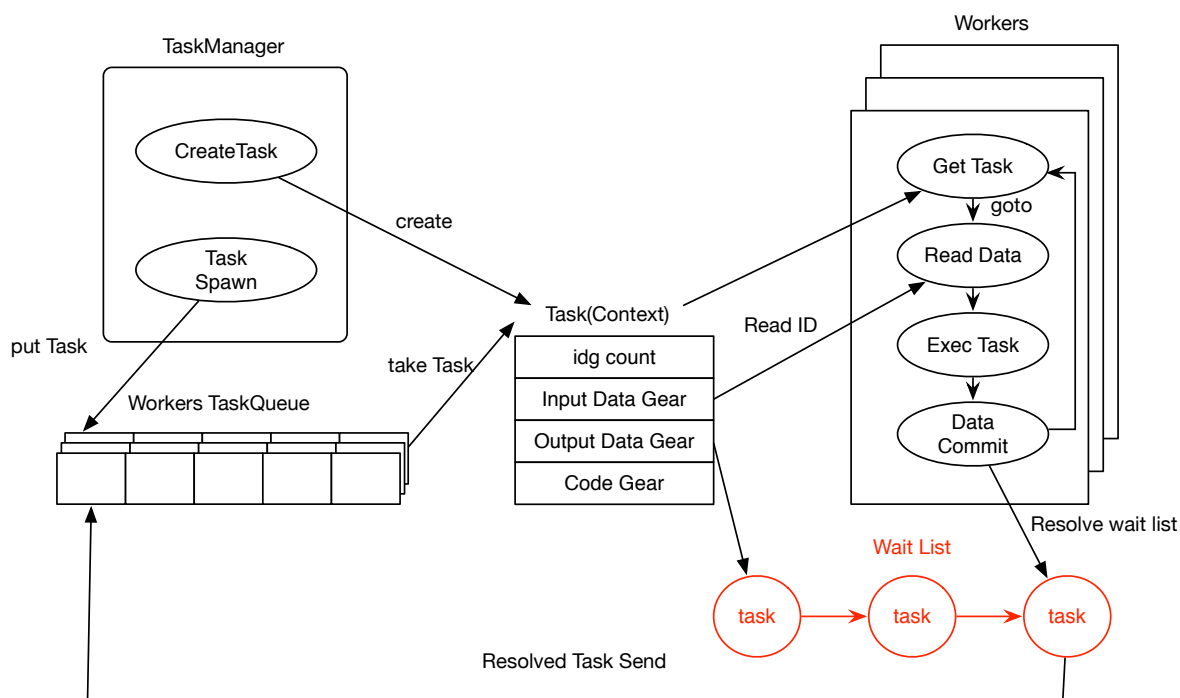


図 4.1: Gears OS の構成図

TaskManager は Task を実行する Worker の生成、管理、Task の送信を行う。Gears OS における Task Queue は Synchronized Queue で実現される。Worker は TaskQueue から Task である Context を取得し、Task の Code Gear を実行し、Output Data Gear の書き出しを行っている。Input/Output Data Gear の依存関係が解決されたものから並列実行される。

TaskManager は Task である Context の生成を行う。実行する Task の Input Data Gear が揃っているなら TaskQueue へ put する。Worker は Task の取得を行い、Task を実行する。Task 実行後 Data Gear の書き出しを行い、再び Task の取得を行う。Data Gear の依存関係が解決されると Task Queue に Task が送り込まれる。

4.1 Context

Context は実行する Code Gear と Data Gear を全て持っている Meta Data Gear である。Context は通常の OS のスレッドに対応する。また Context は並列実行における Task の表現としても用いられる。Context は、ソースコード 4.1 のように定義されている。Context は、実行される Task への Code Gear や、ソースコード 4.1 5、6 行目で記述されているように Code Gear のリスト、Data Gear のリスト、Data Gear を確保するためのメモリ空間を持っている。Context が持つ Data Gear のメモリ空間は事前に確保され、Data Gear のメモリ確保の際に heap の値をずらしメモリを割り当てる。

ソースコード 4.1 13~30 行目は並列実行用の Task として扱うための情報である。待ち合わせの Input Data Gear のカウンタ、Input/Output Data Gear が格納されている場所を示すインデックス、GPU での実行フラグを持っている。

Gears OS では Data Gear は構造体で定義されている。メタ計算では任意の Data Gear を一律で扱うため、全て union で定義されている。(ソースコード 4.1 33 行目~) Context には Data Gear の Data Type の情報が格納されている。この情報から確保する Data Gear のサイズなどを決定する。

ソースコード 4.1: Context

```

1 /* Context definition */
2 struct Context {
3     enum Code next;
4     int codeNum;
5     __code (**code) (struct Context*);
6     union Data **data;
7     void* heapStart;
8     void* heap;
9     long heapLimit;
10    int dataNum;
11
12    // task parameter
13    int idgCount; //number of waiting dataGear

```

```

14 |     int idg;
15 |     int maxIdg;
16 |     int odg;
17 |     int maxOdg;
18 |     int gpu; // GPU task
19 |     struct Worker* worker;
20 |     struct TaskManager* taskManager;
21 |     struct Context* task;
22 |     struct Element* taskList;
23 | #ifdef USE_CUDAWorker
24 |     int num_exec;
25 |     CUmodule module;
26 |     CUfunction function;
27 | #endif
28 |     /* multi dimension parameter */
29 |     int iterate;
30 |     struct Iterator* iterator;
31 | };
32 |
33 | union Data {
34 |     struct Meta {
35 |         enum DataType type;
36 |         long size;
37 |         long len;
38 |         struct Queue* wait; // tasks waiting this dataGear
39 |     } Meta;
40 |     struct Context Context;
41 |     // Stack Interface
42 |     struct Stack {
43 |         union Data* stack;
44 |         union Data* data;
45 |         union Data* data1;
46 |         enum Code whenEmpty;
47 |         enum Code clear;
48 |         enum Code push;
49 |         enum Code pop;
50 |         enum Code pop2;
51 |         enum Code isEmpty;
52 |         enum Code get;
53 |         enum Code get2;
54 |         enum Code next;
55 |     } Stack;
56 |     // Stack implementations
57 |     struct SingleLinkedStack {
58 |         struct Element* top;
59 |     } SingleLinkedStack;
60 |     ....
61 | }; // union Data end           this is necessary for context generator

```

Context は、ソースコード 4.2 のように Code Gear の番号を持っており。初期化の際に Code Gear のアドレスと対応付けている。(ソースコード 4.3)

ソースコード 4.2: enum で定義された Code Gear の番号

```

1 enum Code {
2     C_popSingleLinkedStack,
3     C_pushSingleLinkedStack,
4     C_stackTest3,
5     C_assert3,
6     ...
7 };

```

ソースコード 4.3: Context の初期化

```

1 context->code[C_popSingleLinkedStack] = popSingleLinkedStack_stub;
2 context->code[C_pushSingleLinkedStack] = pushSingleLinkedStack_stub;
3 context->code[C_stackTest3] = stackTest3_stub;
4 context->code[C_assert3] = assert3_stub;

```

Data Gear も Code Gear と同様に Context が番号を持っている。(ソースコード 4.4) Context の初期化の際に引数格納用の Data Gear が生成される。この Data Gear は Code Gear が継続する際に、継続先の Code Gear が要求する引数を格納するためのものである。生成された Data Gear は data のリストと番号の対応から参照される。

ソースコード 4.4: enum で定義された Data Gear の番号

```

1 enum DataType {
2     D_Code,
3     D_SingleLinkedStack,
4     D_Stack,
5     D_TaskManager,
6     D_Worker,
7     ...
8 };

```

4.2 TaskManager

TaskManager は、CPU、GPU の数に応じた Worker の生成、管理、Task の送信を行う。ソースコード 4.5 は TaskManager の Interface である。

TaskManager は、初期化の際にそれぞれ指定した CPU、GPU の数の Worker を生成する。また、実行する Task の Input Data Gear が用意されているかどうか判断し、全て用意されていた場合、その Task を Worker の Queue に送信する。

ソースコード 4.5: TaskManager の Interface

```

1 typedef struct TaskManager<Impl>{
2     union Data* taskManager;
3     struct Context* task;
4     struct Element* taskList;
5     __code spawn(Impl* taskManager, struct Context* task, __code next
6     (...));

```



```
6 |     __code spawnTasks(Impl* taskManagerImpl, struct Element* taskList,  
7 |     __code next1(...));  
8 |     __code setWaitTask(Impl* taskManagerImpl, struct Context* task,  
9 |     __code next(...));  
10 |     __code shutdown(Impl* taskManagerImpl, __code next(...));  
11 |     __code incrementTaskCount(Impl* taskManagerImpl, __code next(...));  
12 |     __code decrementTaskCount(Impl* taskManagerImpl, __code next(...));  
13 |     __code next(...);  
14 |     __code next1(...);  
15 | } TaskManager;
```

4.3 TaskQueue

Gears OS における TaskQueue は Synchronized Queue で実現される。Worker TaskQueue は TaskManager を経由して Task を送信するスレッドと、Task を取得する Worker 自身のスレッドで扱われる。Gears OS の TaskQueue はマルチスレッドでの操作を想定しているため、データの一貫性を保証する必要がある。そのため、データの一貫性を並列実行時でも保証するために Compare and Swap(CAS) を利用して Queue の操作を行っている。CAS はデータの比較・置換をアトミックに行う命令である。メモリからデータの読みだし、変更、メモリへのデータの書き出しという一連の処理を CAS を利用することで処理の間に他のスレッドがメモリに変更を加えないことを保証することができる。CAS に失敗した場合は置換を行わず、再びデータの呼び出しから始める。

4.4 Workers

Worker は自身の Queue から Task を取得し、Task の Code Gear を実行し、Output Data Gear の書き出しを行っている。Worker は初期化の際に スレッドを生成する。生成されたスレッドはまず、Context を生成する。Context をスレッド毎に生成することで、メモリ空間をスレッド毎に持てるため他のスレッドを止めることはない。Context の生成後は Queue から Task を取得する。Task は Context で実現されているため Worker 自身の Context と Context である Task を入れ替え、Task を実行する。Task の実行後に Data Gear の書き出しと依存関係の解決を行う。その後、Context を Worker の Context に入れ替え、再び Task を取得する。

第5章 Interface

Interface は Gears OS のモジュール化の仕組みである。Interface は呼び出しの引数になる Data Gear の集合であり、そこで呼び出される Code Gear のエントリである。呼び出される Code Gear の引数となる Data Gear はここで全て定義される。

Data Gear は、ノーマルレベルとメタレベルで見え方が異なる。ノーマルレベルの Code Gear では Data Gear の引数に見える。しかし、メタレベルでは Data Gear は Context が持つ構造体である。この見え方の違いを Meta Code Gear である stub Code Gear によって調整する必要がある。

また、CbC は関数呼び出しと異なり、goto による継続で遷移を行う。このため CbC の継続にはスタックフレームがなく引数を格納する場所がない。

Context は初期化の際に引数格納用の Data Gear の領域を確保する。Code Gear が継続する際にはこの領域に引数の Data Gear を格納する。この領域に確保された Data Gear へのアクセスは Interface の情報から行われる。

ソースコード 5.1 は、pushSingleLinkedStack のソースコードである。ノーマルレベルの Code Gear では Stack の push の操作は、push するデータと次の継続先の Code Gear という引数の集合のように見える。しかしメタレベルでは Context が持つ構造体である。

stub Code Gear では Context が確保した 引数格納用の領域に格納した Data Gear を取り出している。Interface を導入することでノーマルレベルとメタレベルのズレの調整を解決した。

ソースコード 5.1: pushSingleLinkedStack

```
1 __code stackTest1(struct Stack* stack) {
2     Node* node = new Node();
3     node->color = Red;
4     goto stack->push(node, stackTest2);
5 }
6
7 __code pushSingleLinkedStack_stub(struct Context* context) {
8     SingleLinkedStack* stack = (SingleLinkedStack*)context->data[D_Stack
9     ]->Stack.stack->Stack.stack;
10    Data* data = context->data[D_Stack]->Stack.data;
11    num Code next = context->data[D_Stack]->Stack.next;
12    goto pushSingleLinkedStack(context, stack, data, next);
13 }
```

```

14 | __code pushSingleLinkedStack(struct SingleLinkedStack* stack, union Data*
    |     data, __code next(...)) {
15 |     Element* element = new Element();
16 |     element->next = stack->top;
17 |     element->data = data;
18 |     stack->top = element;
19 |     goto next(...);
20 | }

```

5.1 Interface の定義

ソースコード 5.2 は Stack の Interface である。typedef struct Stack で Interface を定義する。Impl には実装の型が入る。ソースコード 5.2、2~4 行目の union Data で定義されているものは、Interface の API で用いる全ての Data Gear である。Interface の全ての API で用いる全ての Data Gear は Interface で定義される。ソースコード 5.2、5~13 行目の __code で記述されているものは、Interface の API である。ここでは Stack の API である push や pop などの Code Gear となっている。

ソースコード 5.2: Stack の Interface

```

1 | typedef struct Stack<Impl>{
2 |     union Data* stack;
3 |     union Data* data;
4 |     union Data* data1;
5 |     __code whenEmpty(...);
6 |     __code clear(Impl* stack,__code next(...));
7 |     __code push(Impl* stack,union Data* data, __code next(...));
8 |     __code pop(Impl* stack, __code next(union Data*, ...));
9 |     __code pop2(Impl* stack, __code next(union Data*, union Data*, ...));
10 |     __code isEmpty(Impl* stack, __code next(...), __code whenEmpty(...));
11 |     __code get(Impl* stack, __code next(union Data*, ...));
12 |     __code get2(Impl* stack, __code next(union Data*, union Data*, ...));
13 |     __code next(...);
14 | } Stack;

```

通常 Code Gear、Data Gear に参照するためには Context を通す必要があるが、Interface を記述することでデータ構造の API と Data Gear を結びつけることが出来る。これによりノーマルレベルとメタレベルの分離が可能となった。

5.2 Interface の実装

ソースコード 5.3 は Stack の実装の例である。create の関数は 実装の初期化である。ソースコード 5.3、6~12 行目で実装の Code Gear に代入しているものは Context が持つ

enum で定義された Code Gear の番号である。ソースコード 3.2、3 行目で `stack->pop` へと `goto` しているが、`stack->pop` には Code Gear の番号が入っているため実装した Code Gear へと継続する。このため、ソースコード 3.2 では 6 行目の `popSingleLinkedList` へと継続している。

ソースコード 5.3: SingleLinkedList の実装

```
1 Stack* createSingleLinkedList(struct Context* context) {
2     struct Stack* stack = new Stack();
3     struct SingleLinkedList* singleLinkedList = new SingleLinkedList()
4     ;
5     stack->stack = (union Data*)singleLinkedList;
6     singleLinkedList->top = NULL;
7     stack->push = C_pushSingleLinkedList;
8     stack->pop = C_popSingleLinkedList;
9     stack->pop2 = C_pop2SingleLinkedList;
10    stack->get = C_getSingleLinkedList;
11    stack->get2 = C_get2SingleLinkedList;
12    stack->isEmpty = C_isEmptySingleLinkedList;
13    stack->clear = C_clearSingleLinkedList;
14    return stack;
15 }
16 __code clearSingleLinkedList(struct SingleLinkedList* stack, __code next
17 (...)) {
18     stack->top = NULL;
19     goto next(...);
20 }
21 __code pushSingleLinkedList(struct SingleLinkedList* stack, union Data*
22 data, __code next(...)) {
23     Element* element = new Element();
24     element->next = stack->top;
25     element->data = data;
26     stack->top = element;
27     goto next(...);
28 }
```

第6章 コードの自動生成

stub Code Gear などの Meta Code Gear は通常ユーザーレベルからは見ることはできない Meta Data Gear である Context を扱うため、ユーザー自身が記述することは望ましくない。stub Code Gear は Code Gear 毎に記述する必要があるためユーザーの記述量が多くなる。また、stub Code Gear でユーザーが Context から Data Gear を参照するためのコードが非常に煩雑である。このため Meta Code Gear は自動生成されるのが望ましい。そこで Meta Gear を自動生成するためのスクリプトを導入した。また、このスクリプトによって Context の参照をユーザーレベルから隠すことができ、ユーザーレベルの Code Gear もシンプルになった。

6.1 Meta Code Gear の生成

stub Code Gear は Code Gear 間の継続に挟まれる Meta Code Gear である。必要な Data Gear を Context から参照し、継続する Code Gear へと渡すための Meta Code Gear である。Code Gear 毎に記述する必要がある、継続する Code Gear の引数を見て取り出す Data Gear を選択する。stub Code Gear はユーザーが任意に記述することも出来るが、Meta を扱うため自動生成を行いたい。そのため、stub Code Gear を自動生成する generate stub を Perl スクリプトで作成した。これにより Code Gear の記述量を約半分にすることができる。

ソースコード 3.2 はユーザーレベルの Code Gear である。この Code Gear を generate stub によって変換、stub Code Gear の生成を行なったコードがソースコード 6.1 である。

生成された stub Code Gear は、継続先の Code Gear が引数で指定した Input Data Gear、Output Data Gear を Context から参照している。Gearef は Context から Data Gear を参照するためのマクロである。ソースコード 6.2 はマクロを用いなかった場合の pop stack の stub Code Gear である。Context には Allocation 等で生成した Data Gear へのポインタが格納されている。Code Gear が Context にアクセスする際、ポインタを使用してデータを取り出すため煩雑なコードとなる。そこで Code Gear がデータを参照するための Gearef というマクロを定義した。Gearef は Context から Interface の引数格納用の Data Gear を取り出す。Gearef に Context と Interface の型を渡すことでデータの参照が行える。

GearImpl マクロは Interface の型に含まれた Data Gear から実装の Data Gear を取り出すためのマクロである。実装の Data Gear を取り出す際も、ポインタでの記述が複雑になってしまうため同様に GearImpl を定義した。GearImpl は Context と Interface の型、実装の Data Gear 名を指定することで参照する。

ソースコード 6.1: Stack pop の変換

```

1  __code popSingleLinkedStack_stub(struct Context* context) {
2      SingleLinkedStack* stack = (SingleLinkedStack*)GearImpl(context,
3      Stack, stack);
4      enum Code next = Gearef(context, Stack)->next;
5      Data** O_data = &Gearef(context, Stack)->data;
6      goto popSingleLinkedStack(context, stack, next, O_data);
7  }
8
9  __code popSingleLinkedStack(struct Context *context, struct
10     SingleLinkedStack* stack, enum Code next, union Data **O_data) {
11     Data* data = *O_data;
12     if (stack->top) {
13         data = stack->top->data;
14         stack->top = stack->top->next;
15     } else {
16         data = NULL;
17     }
18     *O_data = data;
19     goto meta(context, next);
20 }
21 __code meta(struct Context* context, enum Code next) {
22     goto (context->code[next])(context);
23 }

```

ソースコード 6.2: マクロを用いない stub Code Gear

```

1  __code popSingleLinkedStack_stub(struct Context* context) {
2      SingleLinkedStack* stack = (SingleLinkedStack*)context->data[D_Stack
3      ]->Stack.stack->Stack.stack;
4      enum Code next = context->data[D_Stack]->Stack.next;
5      Data** O_data = &context->data[D_Stack]->Stack.data;
6      goto popSingleLinkedStack(context, stack, next, O_data);
7  }

```

また、Code Gear は継続の際 meta へと goto する。Context はすべての Code Gear のリストを持っており、継続先の Code Gear へは enum で対応付けられた Code Gear のアドレスのリストを参照して継続を行う。この meta もスクリプトにより自動生成される。

stub Code Gear を生成するために generate_stub は、ソースコード上の Code Gear を全て取得し、引数からその Code Gear に必要な Data Gear を選択する。

generate_stub は stub Code Gear を生成する際、Code Gear の引数と Interface を照

らし合わせ、Code Gear が要求する引数の Data Gear を Context から取り出すための Gearef または GearImpl を決定する。

この時既に stub Code Gear が記述されている Code Gear は stub Code Gear が生成されずに無視される。

generate_stub は Code Gear の変換も行う。ソースコード 6.1 では、popSingleLinked-Stack の引数の Output Data Gear を見て、Output Data Gear の格納を行うコードが挿入されている。また、継続のコードが goto meta へと変換されている。

6.2 Context の生成

generate_context は Context を生成する Perl スクリプトである。Context は生成する際に Code Gear のリストとアドレスの対応、引数格納用の Data Gear の生成、

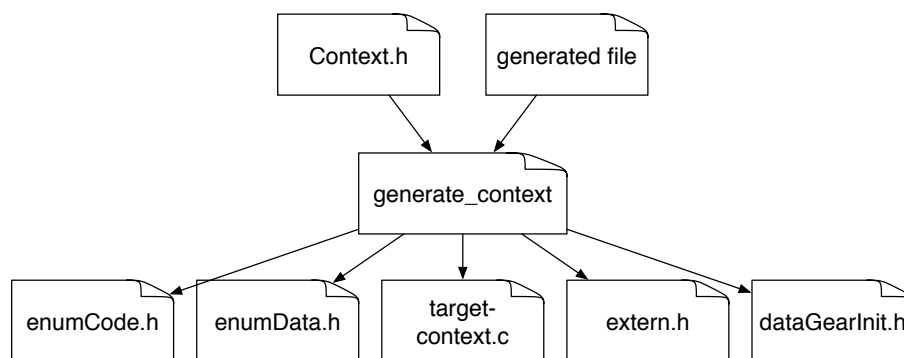


図 6.1: generate_context による Context の生成

Context は Meta Data Gear に相当し、Code Gear や Data Gear を管理している。

generate_context は context.h を読み宣言されている Data Gear を取得する。Code Gear の取得は指定された generate_stub で生成されたコードから `_code` 型を見て行う。取得した Code Gear、Data Gear の enum の定義は enumCode.h、enumData.h に生成される。

Code/Data Gear の名前とポインタの対応は generate_context によって生成される enum Code、enum Data を指定することで接続を行う。また、generate context は取得した Code/Data Gear から initContext の生成も行う。

Context には Allocation 等で生成した Data Gear へのポインタが格納されている。Code Gear は Context を通して Data Gear へアクセスする。Data Gear の Allocation を行うコードは dataGearInit.c に生成される。

第7章 xv6 の CbC への書き換え

Gears OS をハードウェア上で実装するために、ARM[?] プロセッサを搭載したシングルボードコンピュータである Raspberry Pi[?] 上で Gears OS 実装したい。ハードウェア上でのメタレベルの計算や並列実行を行うために、Linux 等に比べてシンプルである xv6 の機能の一部を Gears OS に置き換えることで実現させる。xv6 は UNIX V6 を x86 へ再実装したものであるが、ここでは xv6 を Raspberry pi 用に移植した xv6_rpi[?] を用いて実装する。

Xv6 は 2006 年に MIT のオペレーティングシステムコースで教育用の目的として開発されたオペレーティングシステムである。Xv6 はプロセス、仮想メモリ、カーネルとユーザの分離、割り込み、ファイルシステムなどの基本的な Unix の構造を持つにも関わらず、シンプルで学習しやすい。

7.1 xv6 の構成要素

xv6 はカーネルと呼ばれる形式をとっている。カーネルは OS にとって中核となるプログラムである。xv6 ではカーネルとユーザープログラムは分離されており、カーネルはプログラムにプロセス管理、メモリ管理、I/O やファイルの管理などのサービスを提供する。ユーザープログラムがカーネルのサービスを呼び出す場合、システムコールを用いてユーザー空間からカーネル空間へ入りサービスを実行する。カーネルは CPU のハードウェア保護機構を使用して、ユーザー空間で実行されているプロセスが自身のメモリのみアクセスできるように保護している。ユーザープログラムがシステムコールを呼び出すと、ハードウェアが特権レベルを上げ、カーネルのプログラムが実行される。この特権レベルを持つプロセッサの状態をカーネルモード、特権のない状態をユーザーモードという。

7.1.1 システムコール

ユーザープログラムがカーネルの提供するサービスを呼び出す際にはシステムコールを用いる。ユーザープログラムがシステムコールを呼び出すと、トラップが発生する。トラップが発生すると、ユーザープログラムは中断され、カーネルに切り替わり処理を行う。ソースコード 7.1 は xv6 のシステムコールのリストである。

ソースコード 7.1: xv6 のシステムコールのリスト

```
1 static int (*syscalls[])(void) = {
2     [SYS_fork]      =sys_fork,
3     [SYS_exit]     =sys_exit,
4     [SYS_wait]     =sys_wait,
5     [SYS_pipe]     =sys_pipe,
6     [SYS_read]     =sys_read,
7     [SYS_kill]     =sys_kill,
8     [SYS_exec]     =sys_exec,
9     [SYS_fstat]    =sys_fstat,
10    [SYS_chdir]    =sys_chdir,
11    [SYS_dup]      =sys_dup,
12    [SYS_getpid]   =sys_getpid,
13    [SYS_sbrk]     =sys_sbrk,
14    [SYS_sleep]    =sys_sleep,
15    [SYS_uptime]   =sys_uptime,
16    [SYS_open]     =sys_open,
17    [SYS_write]    =sys_write,
18    [SYS_mknod]    =sys_mknod,
19    [SYS_unlink]   =sys_unlink,
20    [SYS_link]     =sys_link,
21    [SYS_mkdir]    =sys_mkdir,
22    [SYS_close]    =sys_close,
23 };
```

7.1.2 プロセス

プロセスとは、カーネルが実行するプログラムの単位である。xv6 のプロセスは、ユーザー空間メモリとカーネル用のプロセスの状態を持つ空間で構成されている。プロセスは独立しており、他のプロセスからメモリを破壊されたりすることはない。また、独立していることでカーネルそのものを破壊することもない。各プロセスの状態は `struct proc` によって管理されている。プロセスは `fork` システムコールによって新たに生成される。`fork` は新しく、親プロセスと呼ばれる呼び出し側と同じメモリ内容の、子プロセスと呼ばれるプロセスを生成する。`fork` システムコールは、親プロセスであれば子プロセスの ID、子プロセスであれば 0 を返す。親プロセスと子プロセスは最初は同じ内容を持っているが、それぞれ異なるメモリ、レジスタで実行されているため、片方のメモリ内容を変更してももう片方に影響はない。`exit` システムコールはプロセスの停止を行い、メモリを解放する。`wait` システムコールは終了した子プロセスの ID を返す。子プロセスが終了するまで待つ。`exec` システムコールは呼び出し元のプロセスのメモリをファイルシステムのファイルのメモリイメージと置き換え実行する。ファイルには命令、データなどの配置が指定されたフォーマット通りになっていなければならない。xv6 は ELF と呼ばれるフォーマットを扱う。

7.1.3 ファイルディスクリプタ

ファイルディスクリプタは、カーネルが管理するプロセスが読み書きを行うオブジェクトを表す整数値である。プロセスは、ファイル、ディレクトリ、デバイスを開く、または既存のディスクリプタを複製することによって、ファイルディスクリプタを取得する。xv6 はプロセス毎にファイルディスクリプタのテーブルを持っている。ファイルディスクリプタは普通、0 が標準入力、1 が標準出力、2 がエラー出力として使われる。ファイルディスクリプタのテーブルのエントリを変更することで入出力先を変更することができる。1 の標準出力を close し、ファイルを open することでプログラムはファイルに出力することになる。ファイルディスクリプタはファイルがどのように接続するか隠すことでファイルへの入出力を容易にしている。

7.1.4 ファイルシステム

xv6 のファイルシステムはバイト配列であるデータファイルとデータファイルおよび他のディレクトリの参照を含むディレクトリを提供する。ディレクトリは root と呼ばれる特別なディレクトリから始まるツリーを形成している。絶対パスである `"/dir1/dir2/file1"` というパスは root ディレクトリ内の dir1 という名前のディレクトリ内の dir2 という名前のディレクトリ内の file というデータファイルを指す。相対パスである `"dir2/file2"` のようなパスは、現在のディレクトリ内の dir2 という名前のディレクトリ内の file というデータファイルを指す。

7.2 xv6-rpi の CbC 対応

オリジナルの Xv6 は x86 アーキテクチャで実装されたものだが、xv6-rpi は Raspberry Pi 用に実装されたものである。Xv6 の ARM への移植は フロリダ州立大学によって行われた。

xv6-rpi を CbC で書き換えるために、GCC 上で実装した CbC コンパイラを ARM 向けに build し xv6-rpi のクロスコンパイルを行い、QEMU 上で動作させた。

7.3 システムコールの書き換え

第8章 結論

本論文では Gears OS のプロトタイプ的设计と実装、メタ計算である Context と stub の生成を行う Perl スクリプトの記述、並列実行機構の実装を行った。Code Gear、Data Gear を処理とデータの単位として用いて Gears OS を設計した。Code Gear、Data Gear にはメタ計算を記述するための Meta Code Gear、Meta Data Gear が存在する。メタ計算を Meta Code Gear、によって行うことでメタ計算を階層化して行うことができる。Code Gear は関数より細かく分割されてるためメタ計算を柔軟に記述できる。Gears OS は Code Gear と Input/Output Data Gear の組を Task とし、並列実行を行う。

Code Gear と Data Gear は Interface と呼ばれるまとまりとして記述される。Interface は使用される Data Gear の定義と、それに対する操作を行う Code Gear の集合である。Interface は複数の実装をもち、Meta Data Gear として定義される。従来の関数呼び出しでは引数をスタック上に構成し、関数の実装アドレスを Call するが、Gears OS では引数は Context 上に用意された Interface の Data Gear に格納され、操作に対応する Code Gear に goto する。

Context は使用する Code Gear、Data Gear をすべて格納している Meta Data Gear である。通常の計算から Context を直接扱うことはセキュリティ上好ましくない。このため Context から必要なデータを取り出して Code Gear に接続する Meta Code Gear である stub Code Gear を定義した。stub Code Gear は Code Gear 毎に記述され、Code Gear 間の遷移に挿入される。

並列処理を行う際は Context を生成し、Code Gear と Input/Output Data Gear を Context に設定して TaskManager 経由で各 Worker の SynchronizedQueue に送信される。Context の設定はメタレベルの記述になるため、ノーマルレベルでは par goto 文という CbC の goto 文に近い記述で並列処理を行える。この par goto は通常のプログラミングの関数呼び出しのように扱える。

これらのメタ計算の記述は煩雑であるため Perl スクリプトによる自動生成を行なった。これにより Gears OS のコードの煩雑さは改善され、ユーザーレベルではメタを意識する必要がなくなった。

今後の課題は、Go、との比較から、Gears OS が1CPU での動作が遅いということがわかった。Gears OS は par goto 文を使用することで Context を生成し、並列処理を行う。しかし、Context はメモリ空間の確保や使用する全ての Code/Data Gear を設定す

る必要があり、生成にある程度の時間がかかってしまう。そこで、par goto のコンパイルタイミングで実行する Code Gear のフローをモデル検査で解析し、処理が軽い場合は Context を生成せずに、関数呼び出しを行う等の最適化を行なうといったチューニングが必要である。

謝辞

本研究の遂行、本論文の作成にあたり、御多忙にも関わらず終始懇切なる御指導と御教授を賜りました河野真治准教授に心より感謝致します。そして、共に研究を行い暖かな気遣いと励ましをもって支えてくれた並列信頼研究室の全てのメンバーに感謝致します。最後に、有意義な時間を共に過ごした理工学研究科情報工学専攻の学友、並びに物心両面で支えてくれた家族に深く感謝致します。

2019年3月
宮城光希

参考文献

- [1] Jean Yang and Chris Hawblitzel. Safe to the last instruction: Automated verification of a type-safe operating system. In *Proceedings of the 31st ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation*, PLDI '10, pp. 99–110, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [2] Gerwin Klein, Kevin Elphinstone, Gernot Heiser, June Andronick, David Cock, Philip Derrin, Dhammika Elkaduwe, Kai Engelhardt, Rafal Kolanski, Michael Norrish, Thomas Sewell, Harvey Tuch, and Simon Winwood. sel4: Formal verification of an os kernel. In *Proceedings of the ACM SIGOPS 22Nd Symposium on Operating Systems Principles*, SOSP '09, pp. 207–220, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [3] Haogang Chen, Daniel Ziegler, Tej Chajed, Adam Chlipala, M. Frans Kaashoek, and Nikolai Zeldovich. Using crash hoare logic for certifying the fscq file system. In *Proceedings of the 25th Symposium on Operating Systems Principles*, SOSP '15, pp. 18–37, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [4] Helgi Sigurbjarnarson, James Bornholt, Emina Torlak, and Xi Wang. Push-button verification of file systems via crash refinement. In *Proceedings of the 12th USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation*, OSDI'16, pp. 1–16, Berkeley, CA, USA, 2016. USENIX Association.
- [5] Chris Lattner and Vikram Adve. LLVM: A Compilation Framework for Lifelong Program Analysis & Transformation. In *Proceedings of the 2004 International Symposium on Code Generation and Optimization (CGO'04)*, Palo Alto, California, Mar 2004.
- [6] Maged M. Michael and Michael L. Scott. Simple, fast, and practical non-blocking and blocking concurrent queue algorithms. In *Proceedings of the Fifteenth Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*, PODC '96, pp. 267–275, New York, NY, USA, 1996. ACM.

- [7] Ulf Norell. Dependently typed programming in agda. In *Proceedings of the 4th International Workshop on Types in Language Design and Implementation, TLDI '09*, pp. 1–2, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [8] 比嘉健太, 河野真治. Verification method of programs using continuation based c. 情報処理学会論文誌プログラミング (PRO) , Vol. 10, No. 2, pp. 5–5, feb 2017.
- [9] J. Meyerson. The go programming language. *IEEE Software*, Vol. 31, No. 5, pp. 104–104, Sept 2014.
- [10] Eugenio Moggi. Notions of computation and monads. *Inf. Comput.*, Vol. 93, No. 1, pp. 55–92, July 1991.
- [11] 大城信康, 河野真治. Continuation based c の gcc4.6 上の実装について. 第 53 回プログラミング・シンポジウム予稿集, 第 2012 巻, pp. 69–78, jan 2012.
- [12] 宮城光希, 河野真治. Code gear と data gear を持つ gears os の設計. 第 59 回プログラミング・シンポジウム予稿集, 第 2018 巻, pp. 197–206, jan 2018.
- [13] Tokumori Kaito and Kono Shinji. Implementing continuation based language in llvm and clang. *LOLA 2015, Kyoto*, July 2015.
- [14] 小久保翔平, 伊波立樹, 河野真治. Monad に基づくメタ計算を基本とする gears os の設計. 第 133 回情報処理学会システムソフトウェアとオペレーティング・システム研究会 (OS), May 2015.
- [15] 東恩納琢偉, 伊波立樹, 河野真治. Gears os における並列処理. 第 140 回情報処理学会システムソフトウェアとオペレーティング・システム研究会 (OS), May 2017.
- [16] Openmp: Simple, portable, scalable smp programming. <http://www.openmp.org>, . Accessed: 2018/02/05(Mon).
- [17] Cuda zone — nvidia developer. <https://developer.nvidia.com/cuda-zone>. Accessed: 2018/02/05(Mon).
- [18] 徳森海斗. Llvm clang 上の continuation based c コンパイラ の改良. Master's thesis, 琉球大学 大学院理工学研究科 情報工学専攻, 2016.
- [19] 小久保翔平. Code segment と data segment を持つ gears os の設計. Master's thesis, 琉球大学 大学院理工学研究科 情報工学専攻, 2016.