

関数型言語 Haskell による 並列データベースの実装

平成26年度 学位論文(修士)



琉球大学大学院 理工学研究科
情報工学専攻

當眞 大千

要旨

Haskell は純粋関数型プログラミング言語である。モダンな型システムを持ち、型推論と型安全により簡潔で信頼性の高いプログラムを書くことが可能である。また、Haskell は純粋であるため、関数は引数と同じならば必ず同じ値を返すことが保証されている。これは、並列処理において並列化に適した部分が分かりやすくなるというメリットがあり、また状態に依存したバグから解放されることも意味する。

本研究では、Haskell を用いて並列に読み書き可能なデータベースの実装を行う。並列にデータへアクセスする手法として、元となる木構造を変更することなく編集できる非破壊的木構造を用いる。非破壊的木構造は、破壊的代入が存在しない Haskell と相性がよい。

実装した並列データベースの読み込みと書き込みについて性能を計測し、読み込みに関して 98.96 % という高い並列化率が確認でき、マルチコアプロセッサの性能を引き出すことができた。また、掲示板ウェブアプリケーションを開発し、既存の Java の非破壊的木構造データベースとの比較をおこない、Java のおよそ 2 倍の性能を確認することができた。

目次

第 1 章	研究背景と目的	1
第 2 章	Haskell とは	2
2.1	純粋関数型プログラミング	2
2.2	型	4
2.3	モナド	8
2.4	並列実行	10
第 3 章	Haskell による並列データベースの設計	12
3.1	マルチプロセッサで十分な性能を得るためには	12
3.2	非破壊的木構造	13
3.3	ルートノード	16
第 4 章	Haskell による並列データベースの実装	18
4.1	木構造データベース Jungle	18
4.2	木構造データベース Jungle の実装	24
4.2.1	Jungle	24
4.2.2	Tree	24
4.2.3	Node	25
4.3	Haskell の並列処理	26
4.4	Haskell の生産性	26
第 5 章	性能評価	27
5.1	読み込みの性能計測	27
5.2	書き込みの性能計測	29
5.3	ウェブアプリケーションに組み込んだ性能評価	31
5.3.1	掲示板ウェブアプリケーションの実装	31
5.3.2	読み込み	31
5.3.3	書き込み	32
5.3.4	Java を用いた非破壊的木構造データベースとの比較	34
第 6 章	まとめと今後の課題	35
6.1	まとめ	35
6.2	今後の課題	35

付録	37
付録 A 針測環境の構築	37
付録 B Warp を用いたウェブアプリケーションの構築	40
謝辞	42
参考文献	43
発表文献	44

目次

2.1	モナドに属する <code>return</code> 関数	8
2.2	モナドに属する <code>>>=</code> (<code>bind</code>) 関数	8
2.3	<code>rpar/rpar</code> パターン	11
2.4	<code>rpar/rseq/rseq</code> パターン	11
3.1	木構造の非破壊的編集	13
3.2	ステップ1: 変更したいノードまでのパスを求める	14
3.3	ステップ2: 変更したいノードをコピーし、コピーしたノードの内容を 変えた新しいノードを作成する	14
3.4	ステップ3: 求めたパス上に存在するノードをルートノードまでコピーする	14
3.5	ステップ4: 影響のないノードは共有する	15
3.6	並列に読み書きが可能な非破壊的木構造	15
3.7	排他制御なしの非破壊的木構造のアクセス	16
4.1	複数の木を扱える <code>Jungle</code>	19
4.2	ルートノード	20
4.3	<code>NodePath</code>	21
4.4	<code>Node</code> の構成要素	25
5.1	読み込みの性能向上率	28
5.2	書き込みの性能向上率	30

表 目 次

2.1	Haskell の基本的な型	4
4.1	内部のデータ型	19
5.1	読み込みの計測結果	28
5.2	書き込みの計測結果	29
5.3	掲示板ウェブアプリケーションへ実装した機能一覧	31
5.4	掲示板を利用した読み込みの計測結果	32
5.5	Warp の計測結果	32
5.6	掲示板を利用した書き込みの計測結果	34
5.7	Haskell と Java の比較	34
1	学科が提供するブレードサーバの仕様	37
2	ベンチマークで利用した Haskell と Java のバージョン	37

第1章 研究背景と目的

ブロードバンド環境やモバイル端末の普及により、ウェブサービスの利用者数は急激に伸びている。リクエスト数の増加を予想することは困難であり、負荷が増大した場合に容易に拡張できるスケーラビリティが求められる。ここでいうスケーラビリティとは、利用者や負荷の増大に対し、単なるリソースの追加のみでサービスの質を維持することのできる性質のことである。

ウェブサービスにおけるスケーラビリティを実現するための難点の一つとして、データベースが挙げられる。本研究の目的は、スケーラビリティを実現するデータベースの実装である。ウェブサービスにおけるスケーラビリティを実現するためには、並列にデータにアクセスできる設計が必要となる。本研究では並列にデータへアクセスする手法として、非破壊的木構造を利用する。非破壊的木構造では、排他制御をせずにデータへアクセスすることが可能でありスケーラビリティを確保できる [1][2][3]。

データベースの実装には、純粋関数型言語 Haskell を用いる。Haskell は、モダンな型システムを持ち、型推論と型安全により簡潔で信頼性の高いプログラムを書くことが可能である [4]。データベースのやり取りするデータにも型が付くため、セキュリティホールを突くような攻撃の多くが無害化される。また、Haskell は純粋であるため、関数は引数と同じならば必ず同じ値を返すことが保証されている。これは、並列処理において並列化に適した部分が分かりやすくなるというメリットがあり、また状態に依存したバグから解放されることも意味する。

本論文では、Haskell を用いて非破壊的木構造データベースを実装し、読み込みに関して高い並列化率を達成することができ、マルチコアプロセッサの性能を引き出すことができた。また、掲示板ウェブアプリケーションを開発し、既存の Java の非破壊的木構造データベースとの比較をおこない、Java のおよそ 2 倍の性能を確認することができた。

第2章 Haskellとは

Haskell とは純粋関数型プログラミング言語である。

2.1 純粋関数型プログラミング

関数とは、一つの引数を取り一つの結果を返す変換器のことである。関数型プログラミング言語では、関数を引数に適用させていくことで計算を行う。

既存の手続き型言語と異なり、手順を記述するのではなく、この関数何であるかということを記述する。例えば、Haskell でフィボナッチ数列を定義するにはソースコード 2.1 のように記述する。

```
fib :: Int -> Int
fib 0 = 0
fib 1 = 1
fib n = fib (n-2) + fib (n-1)
```

ソースコード 2.1: フィボナッチ数列

Haskell は、関数を引数を適用するという考えに基づいて、抽象的なプログラミングを可能とする。

純粋関数型プログラミングでは、変数の代入は一度のみで後から書き換えることはできない。また、関数自体は副作用を持たない^{注1}。関数にできることは、何かを計算してその結果を返すことだけである。そのため、引数が同じならば関数は必ず同じ値を返すことが保証されている。この性質は関数の理解を容易にし、プログラムの証明を可能にする。正しいと分かる単純な関数を組み合わせ、より複雑な正しい関数を組み立てていくのが関数型言語のプログラミングスタイルである。

関数型プログラミング言語は、関数を第一級オブジェクトとして扱うことができ、高階関数を定義することができる。これは、引数として関数を取ったり戻り値として関数を返すことができるということである。高階関数は問題解決の強力な手段であり、関数型プログラミング言語にはなくてはならないものである。Haskell では標準ライブラリに、リストを処理するための便利な高階関数がいくつも定義されている。

Haskell では、全ての関数は一度に一つの引数だけを取る。複数の引数を取るように見える関数は、実際には1つの引数を取り、その次の引数を受け取る関数を返す。このように関数を返すことで全ての関数を一引数関数として表すことをカーリー化という。カーリー化

^{注1}副作用を実現するには、Haskell のアクションという仕組みを用いる

によって、関数を本来より少ない引数で呼び出した際に部分適用された関数を得ることができる。

再帰もまた関数型プログラミング言語において必要不可欠な要素である。再帰とは、関数を関数自身を使って定義することをいう。関数型プログラミング言語では、ループといった処理を行う場合再帰を用いる。また、リストの畳み込み関数といった再帰を用いた関数が標準ライブラリで提供されている。

関数型言語は手続き型言語と比較して、関数の利用に関する制約が少ない。Haskell では、関数を用いたプログラミングを簡潔かつ強力にするための機能を多く提供している。関数をリストなどのデータ構造の要素にしたり、関数が引数として関数を取ったり、関数の返り値として関数を返したり、関数を自分自身を用いて定義したりできる。

2.2 型

Haskell では、すべての式、すべての関数に型がある。値の型は、その値が同じ型の別の値と何らかの性質を共有していることを示す。例えば、数値は加算できる、文字列は表示できるといった性質である。

型システムはプログラムに抽象をもたらす。抽象を導入することで、低水準の詳細を気にせずプログラミングが可能になる。例えば、値の型が文字列ならば、どのように実装されているかという細かいことは気にせず、その文字列が他の文字列と同じように振る舞うとみなすことができる。

GHCi^{注2} では、式の前に `:type` コマンドを付けることで、式の型を確認することができる。

```
ghci> :type True
True :: Bool
```

ソースコード 2.2: 型の確認

Haskell は静的型検査によりエラーを広範囲に検出することができる。データ構造を独自の型で表現することができ、その定義したデータ構造も型検査でエラーがないか調べることができる。

基本的な型

Haskell は多くの基本型を提供している。Haskell の基本型を表 2.1 に示す。Haskell では、全ての型の名前は大文字で始まる。

表 2.1: Haskell の基本的な型

型名	概要
Bool	真理値
Char	文字
String	文字列
Int	固定精度整数
Integer	多倍長整数
Float	単精度浮動小数点数

^{注2}Haskell の対話環境

リスト型

リストは同じ型の要素の並びである。角括弧で包み、各要素はコンマで区切る。リストの長さに制限はない。空リストは [] で表す。Haskell は遅延評価を行うので無限リストを作成することもできる。

リストの例をソースコード 2.3 に示す。

```
ghci> :type [True, False, False]
[True, False, False] :: [Bool]

ghci> :type ['a','b','c','d']
['a','b','c','d'] :: [Char]

ghci> :type [[True, False], [False, True]]
[[True, False], [False, True]] :: [[Bool]]
```

ソースコード 2.3: Haskell のリスト

リストのリストを作ることもできる。

型の安全性

Haskell では、評価の際に型に起因するエラーが起きないことを保証している。引数として整数を受け取る関数に文字列を渡そうとしても Haskell のコンパイラはこれを受け付けない。Haskell は、すべての式、すべての関数に型があるためコンパイル時に多くのエラーを捕まえることができる。

型検査でも捕まえられないエラーは存在する。例えば、式 "1 'div' 0" は、型エラーではないが、0 での除算は定義されていないので評価時にエラーとなる。

型推論

Haskell は型推論を持つ。型推論のない静的型付け言語は、プログラマが型の宣言を行うことが強制されるが Haskell では型の宣言は必須ではない。

例として、型の宣言を省略し、引数を 2 倍にして返す関数を定義する。

```
double x = x + x
```

ソースコード 2.4: double の宣言

このとき、double の型は型推論され、次のように明示的に宣言したのと同じになる。

```
double :: Num a => a -> a
double x = x + x
```

ソースコード 2.5: double の型推論

この型の宣言は、「Num のインスタンスである a の型の値を引数にとり、a の型の値を返す」という意味である。a は、多相型である。多相型についてはのちほど説明する。

型推論では、適用可能な最も広い型が選択されてしまうため、制限するには明示的に型宣言を行う。明示的な型宣言は可読性の向上や問題の発見に役に立つため、トップレベルの関数には型を明記することが一般的である。

型の定義

Haskell で新しい型を宣言する一番簡単な方法は、`type` キーワードを使って既存の型に別名を付けることである。

基本型で説明した、`String` 型は、文字のリスト `[Char]` の別名である。標準ライブラリでは、ソースコード 2.6 のように定義されている。

```
type String = [Char]
```

ソースコード 2.6: `String` 型の定義

完全に新しい型を宣言するには、`data` キーワードを用いる。標準ライブラリにおける `Bool` 型はソースコード 2.7 のように定義されている。

```
data Bool = False | True
```

ソースコード 2.7: `Bool` 型の定義

この型宣言は、「`Bool` 型は `True` または `False` の値を取り得る」ということを表している。型のために新しく定義された値、`True` や `False` は値コンストラクタである。値コンストラクタは大文字で始まる必要があり、複数の型に対して同じ名前の値コンストラクタを用いることはできない。

`data` キーワードによる型宣言では、値コンストラクタが引数を取ることもできる。標準ライブラリにおける `Maybe` 型はソースコード 2.8 のように定義されている。

```
data Maybe a = Nothing | Just a
```

ソースコード 2.8: `Maybe` 型の定義

`Maybe` は型引数を取るなので、型コンストラクタと呼ばれる。型コンストラクタは、型引数を受け取ってはじめて具体型を生成する。単なる `Maybe` という型の値は存在できない。`Maybe Int` や、`Maybe Char` といった形で存在することになる。具体型を生成するため何かしらの型引数を渡す必要があるが、殆どの場合、型コンストラクタに明示的に型引数を渡さなくても型推論があるので問題がない。

`data` キーワードによる型宣言では、再帰的に定義することもできる。例えば木構造といったデータ型はソースコード 2.9 のように定義できる。

```
data Tree a = EmptyTree | Node a (Tree a) (Tree a)
```

ソースコード 2.9: 再帰的なデータ型の定義

この型宣言は、「`Tree a` 型は、空の木、もしくは何らかの値 `a` と 2 つの木を含む要素である」ということを表している。

多相型

Haskell の型は多相的である。型変数を使い、型を抽象化できる。型変数は、型安全を保ちながら、関数を複数の型に対して動作するようにできる。Haskell の型の名前は全て大文字から始まるが、型変数は小文字から始まる。任意の型のリストを引数に取り、その型の先頭要素を返すという関数 `head` の型はソースコード 2.10 のように定義される。

```
head :: [a] -> a
```

ソースコード 2.10: 型変数

多重定義型

Haskell の `(+)` は、整数や浮動小数点数のどちらにも使える。これは型にクラス制約を含めることで実現している。

```
ghci> :t (+)
(+) :: Num a => a -> a -> a
```

ソースコード 2.11: クラス制約

`=>` というシンボルの前にあるものがクラス制約である。これは、`a` が `Num` 型クラスのインスタンスでなければいけないということを意味する。`Num` 型クラスのインスタンスとなる型は数値型である。

型クラスは型の振る舞いを定義するものである。ある型クラスのインスタンスである型は、その型クラスに属する関数の集まりを実装する。これは、それらの関数とその型ではどのような意味になるのか定義するということである。

例えば、`Eq` 型クラスのインスタンスとなる型は等値性をテストできる。この型クラスに属させるためには、`(==)` と、`(/=)` の 2 つの関数を実装する。

Haskell の型クラスは、動的型付けの利点を安全で使いやすい形で実現するものである。

自作のデータ型を作成する際は、型クラスを利用することで、既存の Haskell ライブラリを利用できる。特定の型クラスは自動導出することも可能である。自動導出には `deriving` キーワードを使う。ソースコード 2.12 は、`Show` のインスタンスを自動導出している。

```
data Tree a = EmptyTree | Node a (Tree a) (Tree a) deriving (Show)
```

ソースコード 2.12: 型クラスの自動導出

2.3 モナド

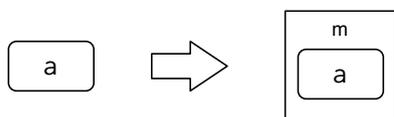
Haskell では、さまざまな目的にモナドを使う。I/O 処理を行うためには IO モナドを使う必要がある。プログラミングを行うにあたり、I/O 処理は欠かせないため、Haskell を利用するにあたってモナドの理解は必須である。

モナドとは、型クラスの 1 つである。モナドとなる型は、型変数として具体型をただ 1 つ取る。これにより何かしらのコンテナに包まれた値を実現する。モナドの振る舞いは型クラスとして実装し、関数として `return` および `>>=` (bind) を定義する。

```
return :: Monad m => a -> m a
(>>=) :: Monad m => m a -> (a -> m b) -> m b
```

ソースコード 2.13: モナドに属する関数

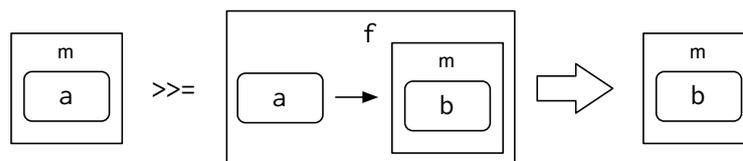
`return` は値を持ち上げてコンテナに包む機能を実装する (図 2.1)。



`return :: Monad m => a -> m a`

図 2.1: モナドに属する `return` 関数

`bind` は、「コンテナに包まれた値」と、「普通の値を取りコンテナに包まれた値を返す関数」を引数にとり、コンテナに包まれた値をその関数に適用する (図 2.2)。適用する際、前のコンテナの結果に依存して、後のコンテナの振る舞いを変えられる。



`(>>=) :: Monad m => m a -> (a -> m b) -> m b`

図 2.2: モナドに属する `>>=` (bind) 関数

この 2 つの関数を利用することにより、文脈を保ったまま関数を繋いでいくことができる。Haskell の遅延評価は記述した順序で実行することを保証しないが、モナドの `bind` は実行順序の指定も可能で、IO モナドを `bind` で繋いだものは記述順に実行することができる。

Haskell で副作用を持つ処理を実行するには、IO モナドを利用する。IO モナド自体は単なる命令書であり、命令ではない。`bind` を使って、小さな命令書を合成して大きな命

令書を作成できる。最終的に、`main` という名前をつけることで初めてランタイムにより実行される。

Haskell の関数には副作用がないと述べたが、IO モナドを返す関数にも副作用は存在しない。

例えば、`getChar` という関数がある。呼び出した状況によって、返ってくる文字が違うため副作用があるように見える。しかし、実際にこの関数が返すのは、「一文字読み込む」という命令書である。どんな状況においても同じ命令書を返すため、副作用はない。

2.4 並列実行

Haskell はデフォルトではシングルスレッドで走る。並列に実行したい場合は、`-threaded` 付きでコンパイルし、RTS の `-N` オプションを付けて実行する。`-N` オプションで指定された数だけ、OS のスレッドが立ち上がり実行される。

```
$ ghc -O2 par.hs -threaded
$ ./par +RTS -N2
```

ソースコード 2.14: 並列実行の様子

当然これだけでは並列に動かず、並列に実行できるようにプログラムを書く必要がある。Haskell は遅延評価を行うため、必要となるまで式の評価が遅延される。普段は気にする必要はないが、並列実行ではどのように評価されるか意識する必要がある。並列に動くように処理を分割したとしても、値が必要になるまで評価されない。この問題は、`Control.DeepSeq` モジュールにある `deepseq` 関数を使用し、式を即時評価することで解決できる。

Haskell の並列化手法はいくつかあるが、その中で最もシンプルなのは `Eval` モナドを利用することである。`Control.Parallel.Strategies` モジュールをインポートすることで使用できる。

```
data Eval a
instance Monad Eval

runEval :: Eval a -> a

rpar :: a -> Eval a
rseq :: a -> Eval a
```

ソースコード 2.15: Eval モナド

`rpar` は、引数が並列処理可能であることを示す。`rseq` は、引数を評価し、結果を待つように示す。どちらも式が完全に即時評価されるわけではないので、出力を挟んだり、`deepseq` 関数をうまく活用する必要がある。`runEval` は、評価を実行し結果を返す操作である。実際の利用方法として 2 つのパターンを紹介する。

```
runEval $ do
  a <- rpar (f x)
  b <- rpar (f y)
  return (a,b)
```

ソースコード 2.16: `rpar/rpar`

`rpar/rpar` パターンは即座に `return` される (図 2.3)。単純に並列に動かしたい時に利用する。

```
runEval $ do
  a <- rpar (f x)
  b <- rseq (f y)
  rseq a
  return (a,b)
```

ソースコード 2.17: `rpar/rseq/rseq`

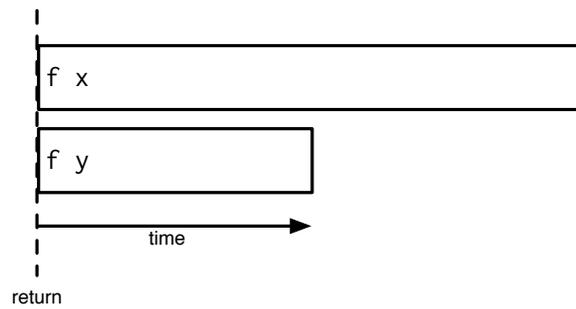


図 2.3: rpar/rpar パターン

rpar/rseq/rseq パターンは、 $f x$ および $f y$ の結果を待ってから return する (図 2.4)。他の処理が結果を必要としている時に利用する。

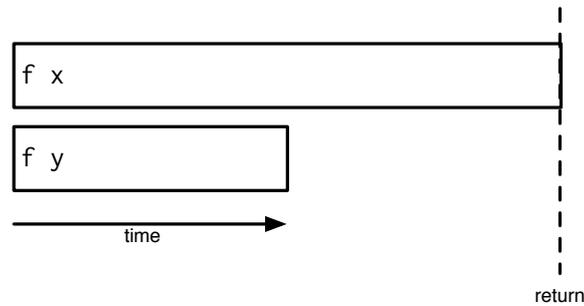


図 2.4: rpar/rseq/rseq パターン

rpar は非常にコストが低いため、リストに対して map するといった適用の仕方でも十分な並列性が出る。そのための関数 parMap も、Control.Parallel.Strategies モジュールには用意されている。

第3章 Haskellによる並列データベース の設計

3.1 マルチプロセッサで十分な性能を得るためには

現在、CPU はマルチコア化が進んでいる。マルチコアプロセッサで線形に性能向上をするためには、処理全体で高い並列度を保たなければならない [5]。

CPU コア数に応じて、データベースを線形に性能向上させたい場合、別々の CPU コアから同時にデータベースへアクセスできればよい。通常は、同一のデータへアクセスする場合、競合が発生してしまい処理性能に限界が生じる。

本研究では、非破壊的木構造という手法を用いて競合が発生する問題を解決する。競合を発生させないためには、既にあるデータを変更しなければよい。非破壊的木構造は、変更元となる木構造を変更しない。そのため、別々の CPU コアから並列にアクセスが可能であり、スケーラビリティを実現できる。

3.2 非破壊的木構造

非破壊的木構造は、木構造を書き換えることなく編集を行う手法である。既にあるデータを変更しないため、データの競合状態が発生せず、並列に読み書きが行える。

また、元の木構造は破壊されることがないため、自由にコピーを行うことができる。コピーを複数作成することでアクセスを分散させることも可能である。

図 3.1 では、ノード 6 をノード A へ書き換える処理を行なっている。

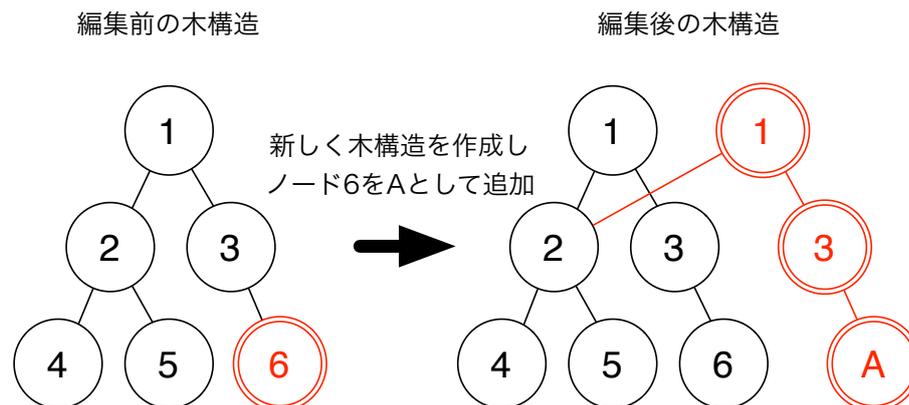


図 3.1: 木構造の非破壊的編集

非破壊的木構造の基本的な戦略は、変更したいノードへのルートノードからのパスを全てコピーする。そして、パス上に存在しない (編集に関係のない) ノードはコピー元の木構造と共有することである。

編集は以下の手順で行われる。

1. 変更したいノードまでのパスを求める (図 3.2)。
2. 変更したいノードをコピーし、コピーしたノードの内容を変更した新しいノードを作成する (図 3.3)。
3. 求めたパス上に存在するノードをルートノードに向かってコピーする。コピーしたノードの一つ前にコピーしたノードを子供として追加した新しいノードを作成する (図 3.4)。
4. 影響のないノードをコピー元の木構造と共有する (図 3.5)。

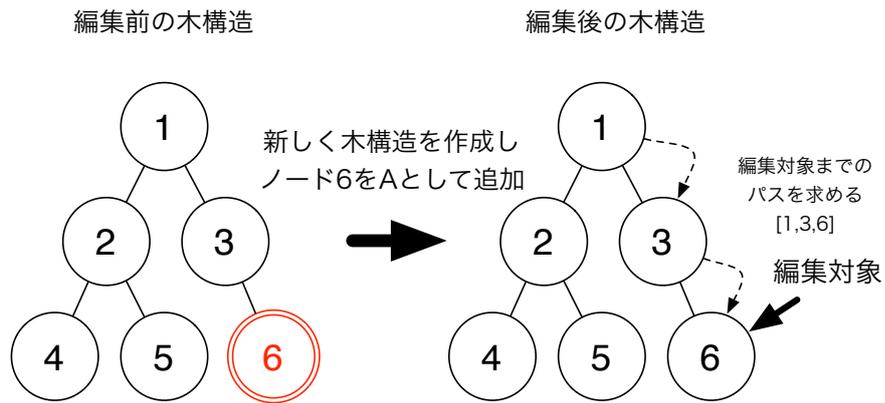


図 3.2: ステップ 1: 変更したいノードまでのパスを求める

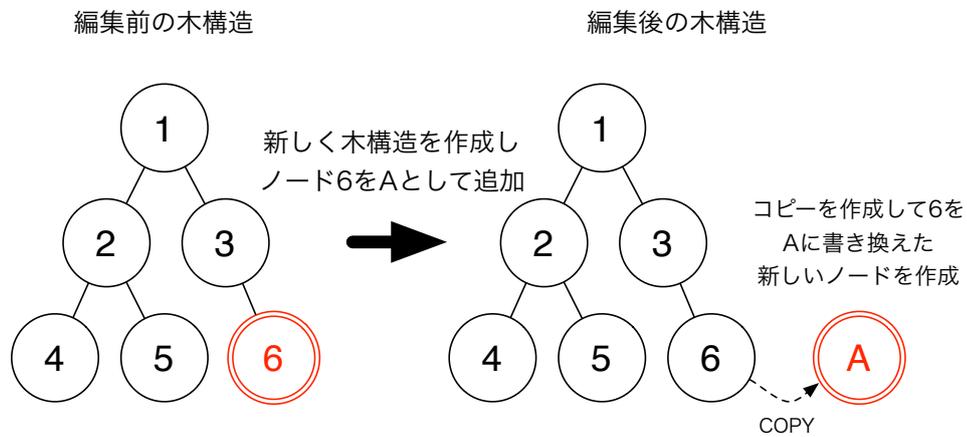


図 3.3: ステップ 2: 変更したいノードをコピーし、コピーしたノードの内容を変更した新しいノードを作成する

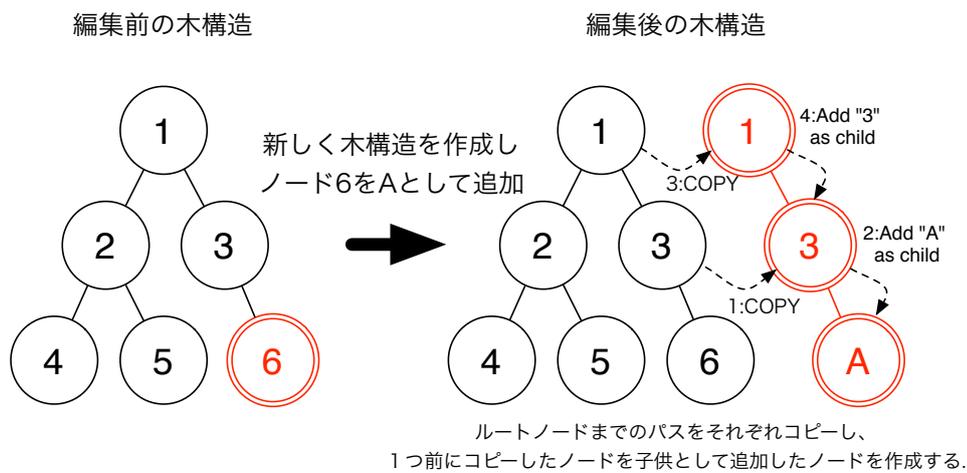


図 3.4: ステップ 3: 求めたパス上に存在するノードをルートノードまでコピーする

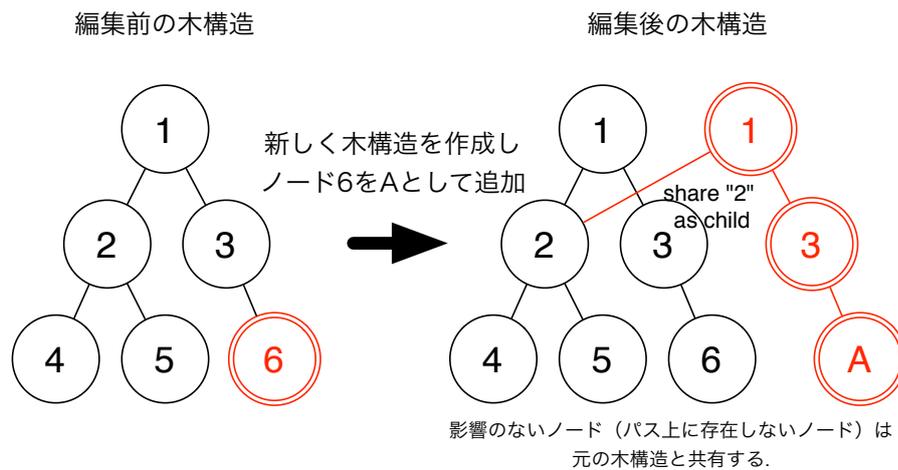


図 3.5: ステップ 4: 影響のないノードは共有する

この編集方法を用いた場合、閲覧者が木構造を参照してる間に、木の変更を行っても問題がない。閲覧者は木が変更されたとしても、保持しているルートノードから整合性を崩さずに参照が可能である。排他制御をせずに並列に読み書きが可能であるため、スケールアップなシステムに有用である。元の木構造は破壊されることがないため、自由にコピーを作成しても構わない。したがってアクセスの負荷の分散も可能である。

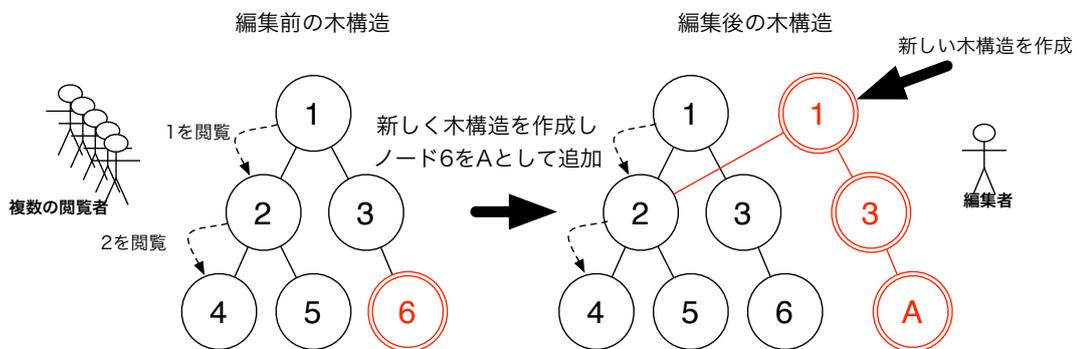
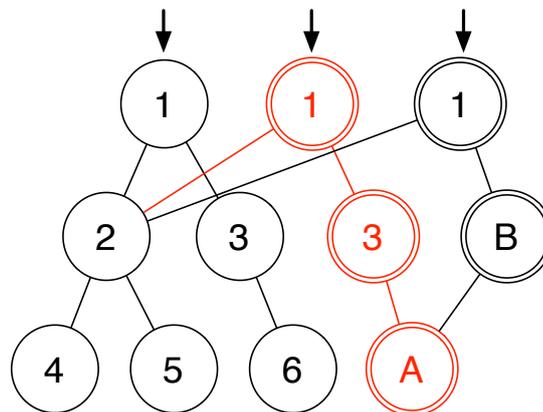


図 3.6: 並列に読み書きが可能な非破壊的木構造

3.3 ルートノード

非破壊的木構造では、ルートノードの管理が重要である。ルートノードは、木の最新の状態を更新・参照するのに使う。ルートノードの情報は、全てのスレッドで共有する必要があり、スレッドセーフに取り扱う必要がある。一度ルートノードの情報を取得すれば、その後は排他制御なしに木構造へアクセスできる (図 3.7)。



どのノードをルートとして見ても
問題なくアクセスできる

図 3.7: 排他制御なしの非破壊的木構造のアクセス

ルートノードはスレッド間で共有する状態を持つため、Haskell では IO モナドを用いる必要がある。これには、Haskell のソフトウェア・トランザクショナル・メモリ (STM) を利用する。STM は排他制御を行わず、スレッドセーフに状態を扱うことができる。STM を利用することでロック忘れによる競合状態や、デッドロックといった問題から解放される。STM は、STM モナドという特殊なモナドの中でのみ変更できる。STM モナドの中で変更したアクションのブロックを `atomically` コンビネータを使ってトランザクションとして実行する (`atomically` コンビネータを用いることで IO モナドとして返される)。いったんブロック内に入るとそこから出るまでは、そのブロック内の変更は他のスレッドから見ることはできない。こちら側のスレッドからも他のスレッドによる変更はみることができず、実行は完全に孤立して行われる。トランザクションから出る時に、以下のことが 1 つだけ起こる。

- 同じデータを平行して変更したスレッドが他になければ、加えた変更が他のスレッドから見えるようになる。
- そうでなければ、変更を実際に実行せずに破棄し、アクションのブロックを再度実行する。

STM は排他制御を行わないため、簡単に扱うことができる。ルートノードの情報の取得だけならば、並列に取得できる。ルートノードの情報の更新の場合は、他から変更があれば再度やり直すということが自動的に行われる。

以前の実装では、ルートノードだけではなく非破壊的木構造全体を STM で管理していた [6]。しかしながら、非破壊的木構造全体を STM で管理すると並列実行時に性能が出ないため、ルートノードのみの管理に変更を行った。

第4章 Haskellによる並列データベースの実装

本章では、並列データベース Jungle の実装について述べる。まず、実装した非破壊的木構造データベースの利用方法について述べ、次に詳細な設計と実装について述べる。

4.1 木構造データベース Jungle

非破壊的木構造データベース Jungle は、Haskell で実装された並列データベースである。非破壊的木構造の方法に則った API を提供する。

Jungle の基本的な使い方の手順について説明する。

1. 木構造を保持する Jungle を作成する (Jungle は複数の木を保持できる)
2. Jungle 内に新しい木を名前をつけて作成する
3. 木の名前を用いて、ルートノードの取得を行い、データを参照する
4. もしくは、木の名前を用いて、ルートノードの更新を行う

Jungle 内部のデータ型

Jungle の内部のデータ型を表 4.1 に表す。木構造の集まりを表現する Jungle、単体の木構造を表現する Tree がある。Tree は外部から見えないように実装されている。

Jungle は複数の Tree の集まりである。Jungle と木構造の名前を利用して最新のルートノードを取得することができる。Node は子と属性を任意の数持てる。

表 4.1: 内部のデータ型

型名	概要
Jungle	木の作成・取得を担当する。
Tree	木の名前とルートノードの情報を保持している。
Node	基本的なデータ構造、子と属性を任意の数持てる。
children	子となるノードを任意の数持つことができる。
attributes	Key と Value の組み合わせを任意の数持つことができる。

Jungle と木の作成

Jungle は複数の非破壊的木構造を扱うことができる (図 4.1)。

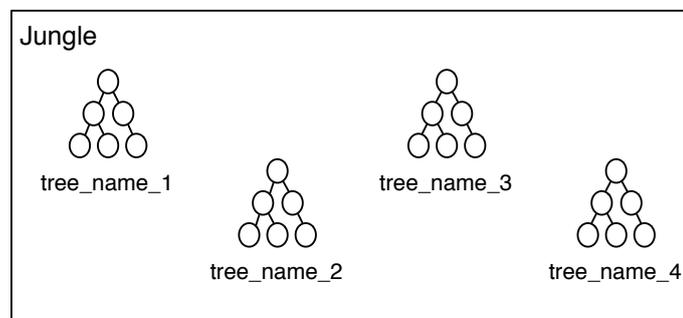


図 4.1: 複数の木を扱える Jungle

木構造の識別には、名前を利用する。名前を付けて作成し、名前を用いることで参照を行う。

createJungle で、Jungle を作成できる。

木を作成するには、createTree を利用する。createTree には、createJungle で作成した Jungle と新しい木の名前を渡す。

型の定義と実際のコードを示す。

```
createJungle :: IO Jungle
createTree :: Jungle -> String -> IO ()

jungle <- createJungle
createTree jungle "name_of_new_tree_here"
```

ソースコード 4.1: データベースと木の作成

ルートノード

非破壊的木構造データベース Jungle では、木の最新の状態を更新・参照するのにルートノードを使う。ルートノードは、最新の木構造の根がどれかの情報を保持している (図

4.2)

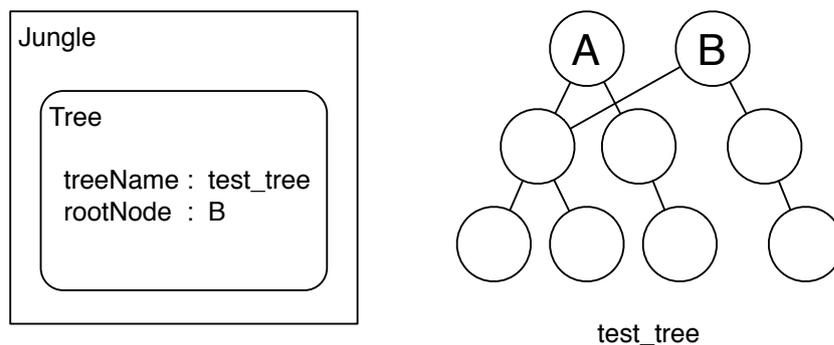


図 4.2: ルートノード

ルートノードに関する API を説明する。

`getRootNode` は、最新のルートノードを取得できる。データベースと木の名前を渡すことで利用できる。例えば、図 4.2 の状態の時は、B というルートノードが取得できる。

```
getRootNode :: Jungle -> String -> IO Node
node <- getRootNode jungle "your_tree_name_here"
```

ソースコード 4.2: 最新のルートノードの取得

木構造を編集する API は全て `Node` を受け取って `Node` を返す。その返ってきた `Node` をルートノードとして登録することで、木構造の最新のルートノードが更新される。

`updateRootNode` は、データベースと木の名前、変更して返ってきた木構造を渡す。

`updateRootNode` をした後は、`getRootNode` で取得できるルートノードが更新された状態になっている。

```
updateRootNode :: Jungle -> String -> Node -> IO ()
updateRootNode jungle "your_tree_name_here" node
```

ソースコード 4.3: ルートノードの更新

`updateRootNodeWith` は、ノードを更新する関数とデータベース、木の名前を渡して利用する。ノードを更新する関数とは、ノードを受け取ってノードを返す関数である。この `updateRootNodeWith` を利用することで、`getRootNode` をした後、編集し `updateRootNode` を行う一連の操作が `atomically` に行われることが保証される。

```
updateRootNodeWith :: (Node -> Node) -> Jungle -> String -> IO ()
updateRootNodeWith func jungle "your_tree_name_here"
```

ソースコード 4.4: 関数を渡してルートノードの更新

木の編集

木の編集には、Node を使う。木の編集に用いる API は全て Node を受け取って Node を返す。非破壊的木構造を利用しているため、getRootNode など取得してきた Node は他のスレッドと干渉することなく自由に参照、編集できる。これらの編集のための API は、編集後 updateRootNode するか、ひとつの関数にまとめて updateRootNodeWith をすることで木構造に反映させることができる。

編集対象のノードを指定するには、NodePath を利用する。NodePath は、ルートノードからスタートし、ノードの子どもの場所を次々に指定したものである。Haskell の基本データ構造であるリストを利用している。

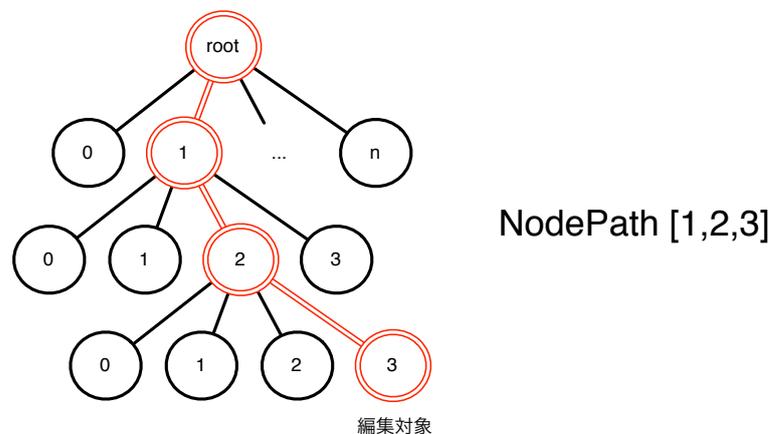


図 4.3: NodePath

addChildAt で、ノードに新しい子を追加できる。addChildAt には、Node と NodePath を渡す。子には Position という場所の情報があるが、インクリメントしながら自動的に指定される。

```
addChildAt :: Node -> Path -> Node
new_node = addChildAt node [1,2]
```

ソースコード 4.5: 子の追加

deleteChildAt で、ノードの子を削除できる。deleteChildAt には、Node と NodePath、削除したい子の Position を指定する。

```
deleteChildAt :: Node -> Path -> Position -> Node
new_node = deleteChildAt node [1,2] 0
```

ソースコード 4.6: 子の削除

putAttribute で、ノードに属性を追加できる。putAttribute には、Node と NodePath、Key、Value を渡す。Key は String、Value は、ByteString である。

```
putAttribute :: Node -> Path -> String -> ByteString -> Node
new_node = putAttribute node [1,2] "key" "value"
```

ソースコード 4.7: 属性の追加

deleteAttribute で、ノードの属性を削除できる。deleteAttribute には、Node と Node-Path、Key を渡す。

```
deleteAttribute :: Node -> Path -> String -> Node
new_node = deleteAttribute node [1,2] "key"
```

ソースコード 4.8: 属性の削除

木の参照

木の参照にも Node を用いる。様々な参照の API があるため、ひとつずつ紹介していく。

getAttributes は、対象の Path に存在する属性を Key を用いて参照できる。

```
getAttributes :: Node -> Path -> String -> Maybe ByteString
bytestring = getAttributes node [1,2] "key"
```

ソースコード 4.9: 属性の取得

ある Node に存在する全ての子に対して、参照を行いたい場合に利用する。getChildren は、対象の Node が持つ全ての子を Node のリストとして返す

```
getChildren :: Node -> Path -> [Node]
nodelist = getChildren node [1,2]
```

ソースコード 4.10: 対象の Node の全ての子を取得

ある Node に存在する全ての子に対して、参照を行いたい場合に利用する。getChildren と違い、子の Position も取得できる。assocChildren は、対象の Node が持つ全ての子を Position とのタプルにし、そのタプルのリストを返す。

```
assocChildren :: Node -> Path -> [(Int, Node)]
nodelist = assocChildren node [1,2]
```

ソースコード 4.11: 対象の Node の全ての子と Position を取得

ある Node に存在する全ての属性に対して、参照を行いたい場合に利用する。assocAttribute は、対象の Node が持つ全ての属性を、Key と Value のタプルとし、そのタプルのリストを返す。

```
assocAttribute :: Node -> Path -> [(String, B.ByteString)]
```

```
attrlist = assocAttribute node [1,2]
```

ソースコード 4.12: 対象の Node の全ての Attribute の Key と Value を取得

numOfChild では、対象の Node が持つ子どもの数を取得できる。

```
numOfChild :: Node -> Path -> Int
```

```
num = numOfChild node [1,2]
```

ソースコード 4.13: 対象の Node の子どもの数を取得

currentChild では、対象の Node が持つ最新の子を取得できる。

```
currentChild :: Node -> Path -> Maybe Node
```

```
node = currentChild node [1,2]
```

ソースコード 4.14: 対象の Node の最新の子を取得

並列実行

木構造データベース Jungle は、並列に実行することができる。アプリケーション側で、データベースを参照や変更する際に各スレッドから呼び出しても問題ない。利用方法も、シングルスレッドで実行する場合と同じである。

4.2 木構造データベース Jungle の実装

開発環境

実装には、Haskell を用いる。コンパイラは、Haskell の並列実行に対応した Glasgow Haskell Compiler (GHC) を用いる。GHC は、Haskell で最も広く使われているコンパイラである [7]。並列実行のための Monad や、スレッドセーフな参照型を提供している。

4.2.1 Jungle

Jungle は木構造の集まりを表現する。木には名前がついており、ルートノードの情報も一緒に保持している。

木の取り扱い

Jungle の木の取り扱いには、Haskell の `Data.Map` を利用している。

Haskell で連想配列を扱いたい場合、平衡木によって実装された `Data.Map` を一般的に用いる。Haskell のライブラリには配列や、ハッシュ・テーブルといったものも存在するがあまり使われない。配列は参照に適しているが、データを追加する際に配列を再作成するためコストが大きい。ハッシュ・テーブルは更新操作に副作用を伴うため、IO モナドの中でしか使うことが出来ず、扱いにくい。`Data.Map` は、挿入や参照が $O(\log n)$ で済む。

また、木の取り扱いには Haskell のソフトウェア・トランザクショナル・メモリ (STM) を利用して状態を持たせ、スレッド間で共有できるようにしてある。これは、各スレッドから木構造を新たに作成できるようにするためである。STM は、スレッド間でデータを共有するためのツールである。STM を利用することでロック忘れによる競合状態や、デッドロックといった問題から解放される。

```
data Jungle = Jungle { getJungleMap :: (TVar (Map String Tree)) }
```

ソースコード 4.15: Tree のデータ型の定義

TVar というのは、Transactional variables の略で、STM で管理する変数に対して利用する。

4.2.2 Tree

Jungle が保持する木構造は、内部的には `Tree` というデータ型で保持している。`Tree` は木の名前と、ルートノードの情報を持っている。実際にユーザが `Jungle` を利用する際は、`Jungle` と木の名前を使ってルートノードを取ってくるため、`Tree` という構造は見えない。

ルートノードの情報はスレッド間で状態を共有する必要がある。スレッドセーフに取り扱う必要があるため、この情報も Haskell のソフトウェア・トランザクショナル・メモリ (STM) を用いて管理している。

```
data Tree = Tree
  { rootNode :: (TVar Node)
  , treeName :: String }
```

ソースコード 4.16: Tree のデータ型の定義

4.2.3 Node

Node は木構造を表現するデータ構造である。再帰的に定義されている。各ノードは Children としてノードを複数持つことができる (図 4.4)。

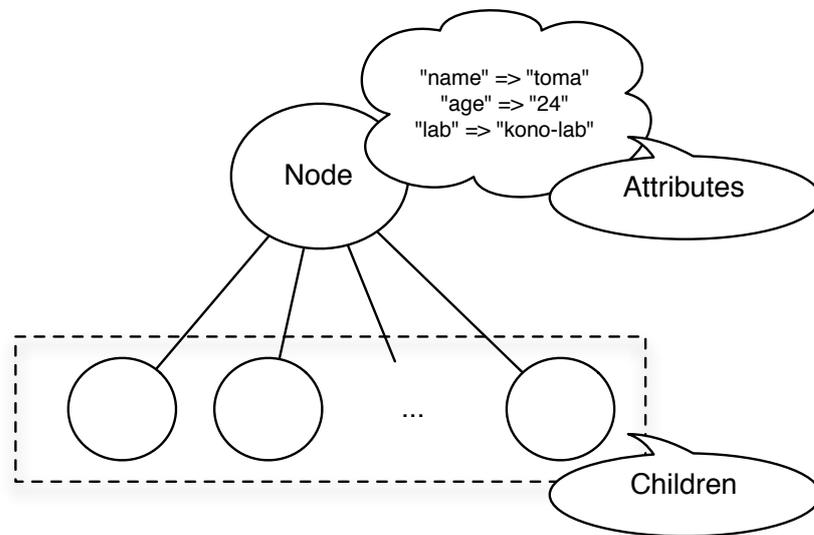


図 4.4: Node の構成要素

Children および Attributes も Data.Map を用いて定義されている (ソースコード 4.17)。

```
data Node = Node
  { children :: (Map Int Node)
  , attributes :: (Map String ByteString) }
```

ソースコード 4.17: Node のデータ型の定義

4.3 Haskell の並列処理

純粋関数型言語 Haskell は並列処理に向いていると言われる。しかしながら、安直にそう言い切ることにはできない。参照透過性があるため、各々の関数の処理は独立している。そのため、並列で走らせても問題ないように思われるが、Haskell は遅延評価を行うため問題が発生する。遅延評価では、結果が必要になるまで評価されない。実装においては、`deepseq` を用いて即時評価を挟むか、出力など計算が必要となる処理を挟むようにする。

Haskell では、様々な並列化手法が提供されている。スレッドを直接操作することも可能である。

本研究では、抽象度の高い `Eval` モナドを利用した。Eval モナドを利用することで、並列処理のために必要な処理の流れを分かりやすく記述することができた。しかしながら `Eval` モナドは実行順序を細かく制御することはできない。`Par` モナドを利用すれば、並列処理の流れを細かく記述できるが、`Eval` モナドのように処理と並列処理の流れを分けて記述し、後からプログラムに並列処理を組み込むというようなことはできない。

Haskell で並列処理を実装する場合は、どの並列化手法を採用するかということをよく考察する必要がある。

4.4 Haskell の生産性

Java を用いた `Jungle` の実装と比較して、コード行数が約 3000 行から約 300 行へと短くなった。

これは Haskell の表現力が高いためである。Haskell では、独自のデータ型を簡単に作成することができる。再帰的なデータ構造の定義も容易である。共通の性質を扱うための型クラスという仕組みが存在し、既存のライブラリを作成したデータ型に利用できる。また、Haskell は参照透過性を持つため、コードの再利用が行い易く、関数同士の結合も簡単である。

同じような機能を実装する場合でも、Java と比較してコード行数が短くなり生産性が向上する。

第5章 性能評価

本章では、非破壊的木構造データベース Jungle がマルチコアプロセッサで性能向上を果たせるのか確認する。まずはじめに、並列読み込みと並列書き込みの性能の計測を行う。また、掲示板ウェブアプリケーションを作成し、Java を用いた非破壊的木構造データベースとの性能比較を行う。計測環境の構築については付録に記載する。

5.1 読み込みの性能計測

非破壊的木構造データベース Jungle の読み込みの性能計測を行う。

計測方法

ブレードサーバ上で、Jungle で作成した木構造を並列に読み込んで性能計測を行う。まず、Jungle を利用して木構造を作成する。並列に実行する際に、読み込みに負荷がかかるように木構造はある程度の大きさとする。今回は木の深さが 8、ノードの数が約 80 万の大きさの木構造を使用する。

木構造を読み込み、ノードの数を数えるタスクを 1,000 個作成し並列実行する。非破壊的木構造は、木構造に変更を加えても他の読み込みのタスクに影響を与えない。そのことを確認するために、木構造は各タスクに渡す前に無作為にノードを追加する。

計測結果

非破壊的木構造データベース Jungle の読み込みの計測結果を表 5.1 に示す。

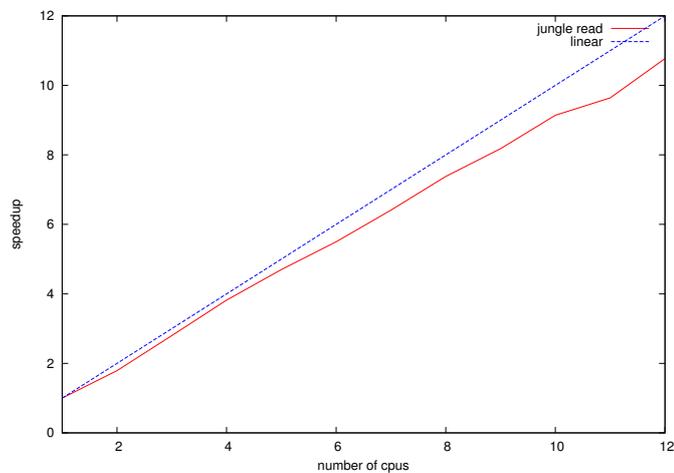
CPU コア数を増やしていくと、実行時間が短くなっていることが分かる。シングルスレッドで実行した場合と比較して、2 スレッドで 1.79 倍、12 スレッドで 10.77 倍の性能向上が見られる。13 スレッド以上は、Intel のハイパースレッディング機能を利用して計測した。ハイパースレッディングは、1 つのプロセッサをあたかも 2 つのプロセッサであるかのように扱う技術である。同時に演算器などを利用することはできないため性能が 2 倍になるわけではないが、概ね 20 %程度クロックあたりの性能が向上すると言われている。実際の計測では、13 スレッド以上は、12 スレッドより速くなることもあるが、遅くなる場合もあるなど安定しない結果となっている。

表 5.1: 読み込みの計測結果

CPU 数	実行時間
1	59.77 s
2	33.36 s
4	15.63 s
8	8.10 s
12	5.55 s
16	5.65 s
20	5.23 s
24	5.77 s

性能向上率のグラフを図 5.1 に示す。線形に近い形で性能が向上していることが分かる。12 スレッドで実行した場合の並列化率は 98.96 %で、非破壊的木構造データベース Jungle は読み込みにおいてスケールするデータベースであることが分かる。

図 5.1: 読み込みの性能向上率



5.2 書き込みの性能計測

非破壊的木構造データベース Jungle の書き込みの性能計測を行う。

計測方法

ブレードサーバ上で、Jungle に木構造を並列に書き込んで性能計測を行う。木の深さが 6、ノードの数が約 1 万の大きさの木構造を作成し Jungle に登録するタスクを 1,000 個作成し、並列に実行する。書き込んだ木構造はノードの数が整合しているかどうか確認する。その後正確に書き込まれてるタスクの数を出力する。Haskell は遅延評価のため、出力などを挟むことで評価が行われるようにしなければならない。

計測結果

非破壊的木構造データベース Jungle の書き込みの計測結果を表 5.2 に示す。

CPU コア数を増やしていくと、実行時間が短くなっていることが分かる。シングルスレッドで実行した場合と比較して、2 スレッドで 1.55 倍、12 スレッドで 3.86 倍の性能向上が見られる。読み込みと比べ、書き込みは Jungle への登録作業があるため並列化率が下がり、性能向上率が低いことが分かる。

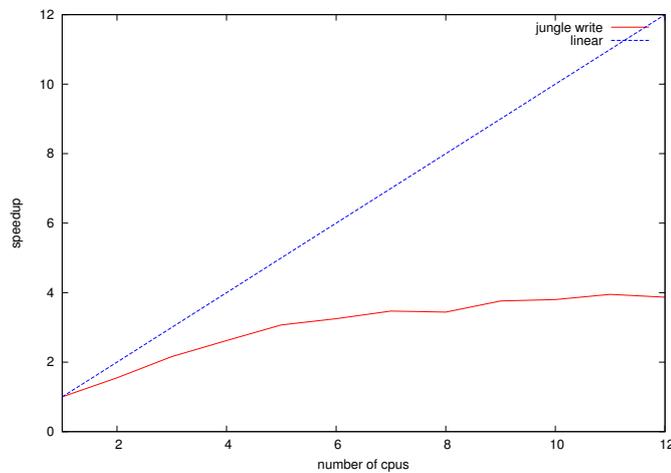
ハイパースレッディングは効果がなく、13 スレッド以上では実行時間が遅くなっている。

表 5.2: 書き込みの計測結果

CPU 数	実行時間
1	52.68 s
2	33.92 s
4	20.11 s
8	15.31 s
12	13.62 s
16	14.92 s
20	18.62 s
24	16.63 s

性能向上率のグラフを図 5.2 に示す。書き込みは並列化率が低く、性能向上が 4 倍程度で止まっている。12 スレッドで実行した場合の並列化率は 80.8 % である。

図 5.2: 書き込みの性能向上率



Jungle へ登録する際に他のスレッドから登録があった場合に、ソフトウェア・トランザクショナル・メモリが処理をやり直すため、並列度が下がっていると思われるが、GHC の問題も考えられる。GHC の IO マネージャーは、マルチスレッドでうまくスケールしないという問題があり、並列度が下がってしまう。GHC の次期バージョンでは IO マネージャーが改善され、スケールするようになる見込みである [8]。

非破壊的木構造データベース Jungle は、書き込みは並列化率が低くなってしまい並列実行に向いていない。読み込みが高速なため、書き込みより読み込みが多用されるシステムに向いているといえる。

5.3 ウェブアプリケーションに組み込んだでの性能評価

5.3.1 掲示板ウェブアプリケーションの実装

木構造データベース Jungle と Haskell の HTTP サーバ Warp を用いて掲示板システムを作成する。Warp を用いたウェブアプリケーションの構築法については付録に記載する。

Warp は容易にプログラムに組み込むことができる。非破壊の木構造データベース Jungle と Warp を組み合わせて、掲示板ウェブアプリケーションを開発する。

掲示板におけるデータベースへの書き込みは、板の作成と、板への書き込みがある。Jungle において、板の作成は新しい木構造の作成、板への書き込みは木構造へのノードの追加で表現する。掲示板へ実装した機能を表 5.3 に示す。

表 5.3: 掲示板ウェブアプリケーションへ実装した機能一覧

関数名	概要
showBoard	板の一覧を表示
createBoard	板の作成
showBoardMessage	板への書き込みの一覧を表示
createBoardMessage	板への書き込み
editMessage	板への書き込みの編集

5.3.2 読み込み

計測方法

掲示板に対して読み込みを行い、負荷をかける。掲示板を立ち上げるサーバと、weighttp を用いて負荷をかけるサーバの 2 台ブレードサーバを用いて測定を行った。

weighttp の起動時のオプションは以下の通りである。リクエストの総数は 100 万、同時に接続するコネクションの数は 1,000、実行時のスレッド数は 10、HTTP Keep-Alives を有効とする。

```
weighttp -n 1000000 -c 1000 -t 10 -k "http://bldsv12.cr.ie.u-ryukyu.ac.jp:3000/showBoardMessage?bname=hello"
```

ソースコード 5.1: weighttp の起動時のオプション

HTTP サーバ Warp は、ハイパースレッディングの効果がなくハイパースレッディング利用時に遅くなるため、12 スレッドまでの計測とする。

計測結果

掲示板の読み込みの計測結果を表 5.4 に示す。

並列で実行した場合、実行時間が短くなっているが性能向上率が低いことが分かる。これは HTTP サーバ Warp がボトルネックとなってしまうためだと考えられる。

Warp を用いてアクセスした際に、”hello, world” と返すだけのプログラムを作成し測定する。結果を表 5.5 に示す。1 スレッドで実行した場合は、Jungle と組み合わせた掲示板より速い。しかしながら、スレッド数が増えていくと掲示板の読み込みとあまり結果が変わらなくなってしまう。Warp は、HTTP サーバのため IO 処理を多用する。この問題は、GHC の IO マネージャーの改良で改善される可能性が高い。

表 5.4: 掲示板を利用した読み込みの計測結果

CPU 数	実行時間
1	60.72 s
2	37.74 s
4	28.97 s
8	27.73 s
12	28.33 s

表 5.5: Warp の計測結果

CPU 数	実行時間
1	49.28 s
2	35.45 s
4	25.70 s
8	27.90 s
12	29.23 s

ウェブアプリケーションを用いて実験する場合、データベースだけがボトルネックとなるように負荷をかけるのは難しい。ただ単にデータを大きくするだけでは、文字列を HTML に変換するコストが大きくなってしまうためである。

5.3.3 書き込み

計測方法

掲示板に対して書き込みを行い、負荷をかける。掲示板を立ち上げるサーバと、weighttp を用いて負荷をかけるサーバの 2 台ブレードサーバを用いて測定を行った。

weighttp では、GET しかできないため URL のクエリ文字列でデータを書き込めるように掲示板ウェブアプリケーションを変更した。weighttp 起動時のオプションは、読み込みと同じである。

計測結果

掲示板の書き込みの計測結果を表 5.6 に示す。並列で実行した場合、実行時間が短くなっているが性能向上率が低いことが分かる。これも HTTP サーバ Warp がボトルネックとなってしまうためだと考えられる。

表 5.6: 掲示板を利用した書き込みの計測結果

CPU 数	実行時間
1	54.16 s
2	36.71 s
4	31.74 s
8	31.58 s
10	32.64 s
12	32.68 s

5.3.4 Java を用いた非破壊的木構造データベースとの比較

非破壊的木構造データベースは、Haskell 版と Java 版の 2 つ存在する。掲示板ウェブアプリケーションを両方の言語で実装し、比較を行う。Haskell ではフロントエンドとして Warp を利用したが、Java では Jetty を利用する。Jetty のバージョンは 6.1.26 を用いる。

Haskell 版と Java 版の掲示板ウェブアプリケーションをブレードサーバ上で実行し、weighthttp で負荷をかけ 100 万リクエストを処理するのにかかる時間を計測する。Haskell と Java の測定結果を表 5.7 に示す。

表 5.7: Haskell と Java の比較

測定	Haskell	Java
読み込み	28.33 s	53.13 s
書き込み	32.68 s	76.4 s

Haskell 版は、Java 版と比較して読み込みで 1.87 倍、書き込みで 2.3 倍の性能が出ている。

書き込みが読み込みより性能差が出ている理由として遅延評価が考えられる。Haskell では書き込みを行う際、完全に評価せず thunk として積み上げていく。thunk とは、未評価の式を追跡するのに使われるものである。遅延評価は、グラフ簡約があるため先行評価より簡約ステップ数が増えることはない。また、不要な計算が省かれるので簡約ステップ数が少なくなることもある。しかしながら、計算の所用領域が増えてしまうのが難点で、ハードウェアが効率的に利用できるメモリの範囲内に収まらなければ即時評価より実行時間が遅くなってしまうことがあるので注意が必要である。本実験では、潤沢にメモリを割り当てているためそういった問題は起きない。

第6章 まとめと今後の課題

6.1 まとめ

本研究では、関数型言語 Haskell を用いて並列データベースの実装をおこなった。

Haskell は、型推論と型安全により簡潔で信頼性の高いプログラムを書くことができる。実装において、Haskell の表現力とコンパイル時に多くのエラーを捕まえるという特徴は、開発期間およびコード行数の短縮に繋がった。また、型安全により実行時に不正にプログラムが終了するといったことがない。

実装した並列データベースの読み込みと書き込みについて性能を計測し、読み込みに関して 98.96 % という高い並列度が確認できた。また、簡単な掲示板ウェブアプリケーションを開発し、既存の Java の非破壊的木構造データベースとの比較をおこない、Java のおよそ 2 倍の性能を確認することができた。

6.2 今後の課題

非破壊的木構造データベース Jungle の今後の課題について述べる。

書き込み処理の並列度の上昇

データベースへの書き込み処理において 80.8 % の並列度しか出ていない。はじめに、プログラムの変更をせずに、GHC の IO マネージャーの改善によりどの程度並列度が向上するのかを調査する必要がある。GHC の IO マネージャーの影響度を計測した後、変更処理の改善方法に調査する。現在ソフトウェア・トランザクショナル・メモリを用いているが、他のスレッドセーフな参照型を用いて性能改善が行えないか確認する。Haskell では、様々なスレッドセーフな参照型が用意されている。ロックが制限的だが、高速な IORef、ロックの使える MVar などである。

分散データベースとしての実装

並列環境で実行できるが、今後は分散データベースとして実行できるようにしたい。トポロジーの形成機能や、サーバ間でのデータアクセスの仕組みを実装する必要がある。サーバ間で木構造の変更を共有するには、木構造を何らかの情報に基づいて、マージする仕組みを導入する必要がある。

永続性の実装

非破壊的木構造データベース Jungle は、オンメモリ上で動作するデータベースである。並列性を損なわない形で、ディスクへの書き出しを実現したい。簡単な実装としては、書き出しを担当するスレッドを作成するといったことが考えられる。

付録 A 計測環境の構築

学科が提供するブレードサーバを用いて、計測環境を構築する。ブレードサーバの仕様を表 1 に示す。

表 1: 学科が提供するブレードサーバの仕様

名前	概要
CPU	Intel(R) Xeon(R) CPU X5650@2.67GHz * 2
物理コア数	12
論理コア数	24
Memory	126GB
OS	Fedora 14

非破壊的木構造データベース Jungle の読み込みと書き込みの性能の計測には 1 台、掲示板ウェブアプリケーションを用いた Java との性能比較には 2 台のブレードサーバを利用する。2 台使用するの、サーバと負荷をかけるクライアントを別々に実行するためである。

Haskell および Java のバージョン

Haskell のコンパイラには The Glasgow Haskell Compiler (GHC) を使用する。GHC は、Haskell で最も広く使われているコンパイラである。ソフトウェア・トランザクショナル・メモリをサポートするなど、並列プログラミングのための Haskell の拡張が行われている。

Haskell および Java のバージョンを表 2 に示す。

表 2: ベンチマークで利用した Haskell と Java のバージョン

言語	バージョン
Haskell	Glasgow Haskell Compiler, Version 7.6.3
Java	Java(TM) SE Runtime Environment (build 1.7.0_51-b13)

サーバのチューニング

ウェブアプリケーションのベンチマークを行う際、サーバの設定に注意を払う必要がある。適切に設定を行わないと、サーバがボトルネックとなってしまう正しい結果が得られない。ウェブアプリケーションのベンチマークを行う際の注意点について述べる。

データを受信したり送信したりするのは OS カーネルである。多くの TCP パケットを要求し、各パケットのサイズが 1500 バイトといった大きなファイルを提供する場合、ウェブアプリケーションというより OS カーネルのテストになってしまう。

接続には、HTTP Keep-Alives を利用する。新しい TCP 接続を確立するのはとても遅く、OS カーネルによって行われる。毎秒多くの新しい接続を作成するようなベンチマークを行うと、OS カーネルのテストになってしまう。

アプリケーションや OS カーネルが完全にハードウェアを使用できるようにするためにいくつか調整を行う必要がある。最初の問題は、ファイル記述子の欠如である。デフォルトはプロセスあたり、1,024 files で非常に貧弱な結果しか得られない。ファイル記述子の現在のリミットは以下のコマンドで取得できる。

```
$ ulimit -aH
```

ソースコード 1: ファイル記述子のリミットの取得

リミットを変更するには、以下のコマンドを実行する。

```
$ sudo sh -c ulimit -HSn 200000
```

ソースコード 2: ファイル記述子のリミットの設定

再起動後も有効にするためには、システムファイルの編集を行う。
/etc/security/limits.conf へ以下の記述を追加する。

```
* soft nofile 200000
* hard nofile 200000
```

ソースコード 3: リミットの設定の追加

次に問題となるのは listen キューの制限である。listen キューとは、保留中のコネクションが繋がれるキューのことである。このキューの長さの制限が小さいと、同時にたくさんのコネクション要求がきた場合、制限を超えた要求を拒否する。listen キューや、その他の設定も含めてベンチマーク用にサーバの設定を変更する。

/etc/sysctl.conf に以下の記述を追加する。

```
fs.file-max = 5000000
net.core.netdev_max_backlog = 400000
net.core.optmem_max = 10000000
net.core.rmem_default = 10000000
net.core.rmem_max = 10000000
net.core.somaxconn = 100000
net.core.wmem_default = 10000000
net.core.wmem_max = 10000000
net.ipv4.conf.all.rp_filter = 1
net.ipv4.conf.default.rp_filter = 1
net.ipv4.ip_local_port_range = 1024 65535
net.ipv4.tcp_congestion_control = bic
net.ipv4.tcp_ecn = 0
net.ipv4.tcp_max_syn_backlog = 12000
net.ipv4.tcp_max_tw_buckets = 2000000
net.ipv4.tcp_mem = 30000000 30000000 30000000
net.ipv4.tcp_rmem = 30000000 30000000 30000000
net.ipv4.tcp_sack = 1
net.ipv4.tcp_syncookies = 0
```

```
net.ipv4.tcp_timestamps = 1
net.ipv4.tcp_wmem = 30000000 30000000 30000000
net.ipv4.tcp_tw_reuse = 1
net.ipv4.tcp_tw_recycle = 1
```

ソースコード 4: システム設定の変更

ファイルを保存後、設定を反映させるには以下のコマンドを実行する。

```
$ sudo sysctl -p /etc/sysctl.conf
```

ソースコード 5: 設定の反映

ベンチマークを行う際、小さなテストでは妥当性が低くなってしまうので注意する。TCP/IP のスタックは保守的な方法で動作し、ダウンロード速度に合わせて徐々に速度を増大させるためである。

また、テストするサーバより遅いベンチマーククライアントを用いると正しい結果は得られない。シングルスレッドで稼働したり、Ruby や Python といった低速なベンチマークツールでテストを行うと、すべてのテストする対象が同じようなパフォーマンスを持っているように見えてしまう。

weighttp

ウェブアプリケーションの性能測定には、weighttp を用いる。weighttp は Web サーバの性能測定ツールで、マルチコア CPU を使ってテストできる [9]。また、livev を使うことで、モダンなポーラ・システムコールを利用し、測定性能を向上できるといった特徴を持つ。同様の性能測定ツールには、Apache Bench や httpref が存在するが非力であり、ボトルネックとなってしまうため使用しない。

weighttp を起動するには、以下の様にコマンドを入力する。

```
$ weighttp -n 1000000 -c 1000 -t 10 -k "http://bldsv12.cr.ie.u-ryukyu.ac.jp:3000"
```

ソースコード 6: weighttp の起動

起動時には対象のサーバの URL を記述する他に、いくつかのオプションを指定できる。

- n ... HTTP リクエストの総数
- c ... 同時に接続する接続数の数
- t ... 作製するネイティブスレッドの数
- k ... HTTP Keep-Alives を有効にする

付録 B Warp を用いたウェブアプリケーションの構築

Warp は、軽量・高速な HTTP サーバである [10]。Haskell の軽量スレッドを活かして書かれている。Haskell のウェブフレームワークである Yesod のバックエンドとして用いられており、現在も開発が続けられている。

Warp を用いてウェブアプリケーションを構築する方法について説明する。

```

application counter request = function counter
  where
    function = routes $ pathInfo request

routes path = findRoute path routeSetting

findRoute path [] = notFound
findRoute path ((p,f):xs)
  | path == p = f
  | otherwise = findRoute path xs

routeSetting = [(["hello"], hello),
                (["hello","world"], world)]

notFound _ = return $
  responseLBS status404 [("Content-type", "text/html")] $ "404"

hello _ = return $
  responseLBS status200 [("Content-type", "text/html")] $ "hello"

world counter = do
  count <- lift $ incCount counter
  return $ responseLBS status200 [("Content-type", "text/html")] $
    fromString $ show count

incCount counter = atomicModifyIORef counter (\c -> (c+1, c))

main = do
  counter <- newIORef 0
  run 3000 $ application counter
    
```

ソースコード 7: Warp を用いたウェブアプリケーションの例

ソースコード 7 は、URL によって出力する結果を変更するウェブアプリケーションである。/hello/world へアクセスがあった場合は、インクリメントされる counter が表示される。

main HTTP サーバを起動するには、Warp の run 関数を利用する。run 関数は、利用する Port 番号と、application というリクエストを受けて何かしらのレスポンスを返す関数の 2 つを引数として受け取る。

関数型言語では、関数を第一級オブジェクトとして扱える。また、今回は Haskell のカリー化された関数の特性を利用し、main 内で作成した IORef 型の counter を部分適用させている。

IORef を用いることで、Haskell で更新可能な変数を扱うことができる。参照透過性を失うように見えるが、Haskell は IO モナドを利用することで純粋性を保っている。IORef 自体が入出力を行うわけではなく、単なる入出力操作の指示にすぎない。IO モナドとし

て糊付けされた単一のアクションに `main` という名前を付けて実行することで処理系が入出力処理を行う。

`application` 及び `routes` , `findRoute` `application` の実装では、`routes` という関数を独自に定義して、URL によって出力を変更している。`application` に渡されるリクエストはデータ型で様々な情報が含まれている。その中のひとつに `pathInfo` という、URL から `hostname/port` と、クエリを取り除いたリストがある。この情報を `routes` という関数に渡すことで、`routeSetting` というリストから一致する URL がないか調べる。`routeSetting` は、URL のリストとレスポンスを返す関数のタプルのリストである。

`notFound` 及び `hello` レスポンスを返す関数は、いくつか定義されている。その中で利用されている `responseLBS` は文字列からレスポンスを構築するためのコンストラクタである。

`world` 及び `incCount` `world` は、インクリメントされる `counter` を表示するための関数である。IORef 内のデータは直接触ることができないため、`incCount` 内で `atomicModifyIORef` を利用してデータの更新を行なっている。`atomicModifyIORef` は、データの更新をスレッドセーフに行うことができる。また、`responseLBS` で構築したレスポンスは、`Resource T` というリーソスの解放を安全に行うために使われるモナドに包まれている。`lift` 関数を用いて、`incCount` の型を持ち上げ調整している。

実際にプログラムを例にして説明したが、Warp は容易にプログラムに組み込むことができる。本研究では、非破壊的木構造データベース `Jungle` と `Warp` を組み合わせて、掲示板ウェブアプリケーションを開発した。

謝辞

本研究を行うにあたり、日頃より多くの助言、ご指導いただきました河野真治助教授に心より感謝申し上げます。

本研究は、JST/CREST 研究領域「実用化を目指した組み込みシステム用ディペンダブル・オペレーティングシステム」[11] D-ADD 研究チームとして実施しました。研究の機会を与えてくださった、株式会社 Symphony の永山辰巳さんに感謝します。

また、データベースの実装にあたり、多くの議論にお付き合い頂いた大城信康さん、並列信頼研究室の全てのメンバーに感謝いたします。

参考文献

- [1] 玉城将士, 河野真治. Cassandra を使った CMS の PC クラスタを使ったスケーラビリティの検証. 日本ソフトウェア科学会, August 2010.
- [2] 玉城将士, 河野真治. Cassandra を使ったスケーラビリティのある CMS の設計. 情報処理学会, March 2011.
- [3] 玉城将士, 河野真治. Cassandra と非破壊的構造を用いた CMS のスケーラビリティ検証環境の構築. 日本ソフトウェア科学会, August 2011.
- [4] Benjamin C. Pierce. *Types and Programming Languages*. MIT Press, 2002.
- [5] Gene M. Amdahl. Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities. In *Proceedings of the April 18-20, 1967, Spring Joint Computer Conference*, AFIPS '67 (Spring), pp. 483–485, 1967.
- [6] 當眞大千, 河野真治, 永山辰巳. Haskell による非破壊的木構造を用いた CMS の実装. 日本ソフトウェア科学会, September 2013.
- [7] The glasgow haskell compiler. <http://www.haskell.org/ghc/>. [Online; accessed 29-Jan-2014].
- [8] Andreas Voellmy, Junchang Wang, Paul Hudak, and Kazuhiko Yamamoto. Mio: A high-performance multicore IO manager for GHC. *Haskell Symposium*, September 2013.
- [9] lighttpd/weighttp. <https://github.com/lighttpd/weighttp>. [Online; accessed 2-Feb-2014].
- [10] The warp package. <http://hackage.haskell.org/package/warp>. [Online; accessed 29-Jan-2014].
- [11] DEOS. <http://www.dependable-os.net/osddeos/data.html>. [Online; accessed 29-Jan-2014].

発表履歴

- Haskell による非破壊的木構造を用いた CMS の実装,
當眞大千, 河野真治 (琉球大学), 永山辰巳 (株式会社 Symphony)
日本ソフトウェア科学会 30 回大会, Sep, 2013
- Haskell による Web Service 構築入門,
當眞大千, 河野真治 (琉球大学)
オープンソースカンファレンス 2013 Okinawa, July, 2013
- CeriumTaskManager におけるマルチコア上での並列実行機構の実装,
當眞大千, 金城裕, 河野真治 (琉球大学)
第 53 回プログラミングシンポジウム, Jan, 2012