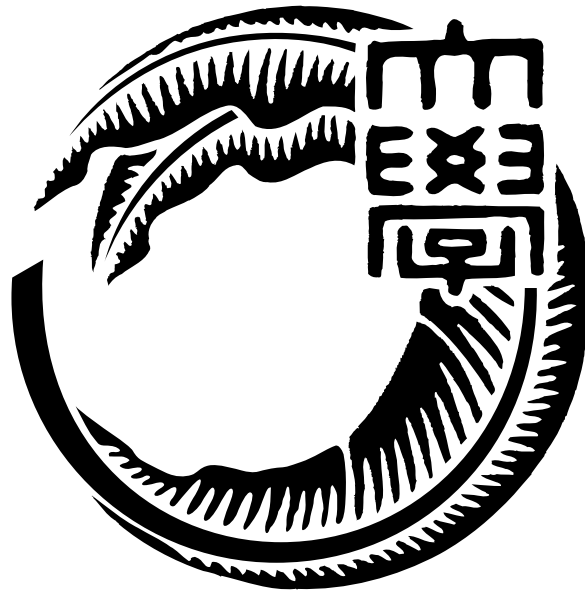


平成27年度 卒業論文

PC画面配信システムTreeVNCの NAT へ
の対応



琉球大学工学部情報工学科

125716B 伊波 立樹

指導教員 河野 真治

目次

第1章	画面共有を利用したコミュニケーション	1
第2章	TreeVNC の概念	2
2.1	VNC	2
2.2	RFB プロトコル	2
2.3	多人数で VNC を使用する際の問題	2
2.4	TreeVNC の構造	3
2.5	TreeVNC の原理	3
2.6	圧縮形式	4
2.7	通信経路	4
2.8	ノード間で行われるメッセージ通信	6
2.9	MulticastQueue	8
2.10	木の再構成	8
2.11	共有画面切り替え	9
2.12	複数のネットワークの対応	10
第3章	NAT 対応	12
3.1	DirectConnection	12
第4章	TreeVNC の追加機能	13
4.1	マルチディスプレイ対応	13
4.2	画面切り替えの安定化	13
4.3	ネックになっているノードへの対処	15
4.4	クライアントへのエラー通知	15
第5章	TreeVNC の評価	16
5.1	画像データ伝達の遅延	16
5.2	実験環境	16
5.3	メッセージを使用した実測	16
5.4	結果	17
第6章	まとめ	20
6.1	NAT を越えた画面切り替え	20
6.2	新機能の評価	20

目 次

2.1	VNC	3
2.2	構成される木構造	4
2.3	ZRLE での問題点	5
2.4	ZRLEE	5
2.5	node 間で行われるメッセージ通信	7
2.6	LOST_CHILD を検知・再接続	9
2.7	Multi Network Tree	10
3.1	遠隔地 Node からの接続	12
4.1	マルチディスプレイへの対応	14
5.1	深さ 1,2 のデータサイズと遅延の関係	18
5.2	深さ 3, 4 のデータサイズと遅延の関係	19

表 目 次

2.1 通信経路とメッセージ一覧	6
----------------------------	---

第1章 画面共有を利用したコミュニケーション

第2章 TreeVNC の概念

2.1 VNC

VNC(Virtual Network Computing) は、RFB プロトコルを用いて遠隔操作を行うリモートデスクトップソフトウェアである。VNC はサーバー側とクライアント (ビューア) 側に分かれている。サーバを起動し、クライアントがサーバに接続を行い遠隔操作を可能とする。

2.2 RFB プロトコル

RFB(remote frame buffer) プロトコル [1] とは、自身の画面を送信し、ネットワーク越しに他者の画面に表示するプロトコルである。ユーザが居る側を RFB クライアント側と呼び、Framebuffer への更新が行われる側は RFB サーバと呼ぶ。Framebuffer とは、メモリ上に置かれた画像データのことである。RFB プロトコルでは、最初にプロトコルバージョンの確認や認証が行われる。その後、クライアントに向けて Framebuffer の大きさやデスクトップに付けられた名前などが含まれている初期メッセージが送信される。RFB サーバ側は Framebuffer の更新が行われるたびに、RFB クライアントに対して Framebuffer の変更部分だけを送信する。更に RFB クライアントの FramebufferUpdateRequest が来るとそれに答え返信する。RFB プロトコルは、描画データに使われるエンコードが多数用意されており、また独自のエンコードを実装することもできるプロトコルである。

2.3 多人数で VNC を使用する際の問題

VNC を使用すればクライアント側にサーバー側の画面を表示することが可能である。しかし、図 2.1 のように多人数のクライアントが 1 つのサーバーに接続してしまうと処理性能が落ちてしまうという問題点がある。

また、ゼミ等の発表で画面配信者が頻繁に切り替わる場合、配信者が替わる度にアプリケーションを終了し、接続をし直さないといけないという問題がある。

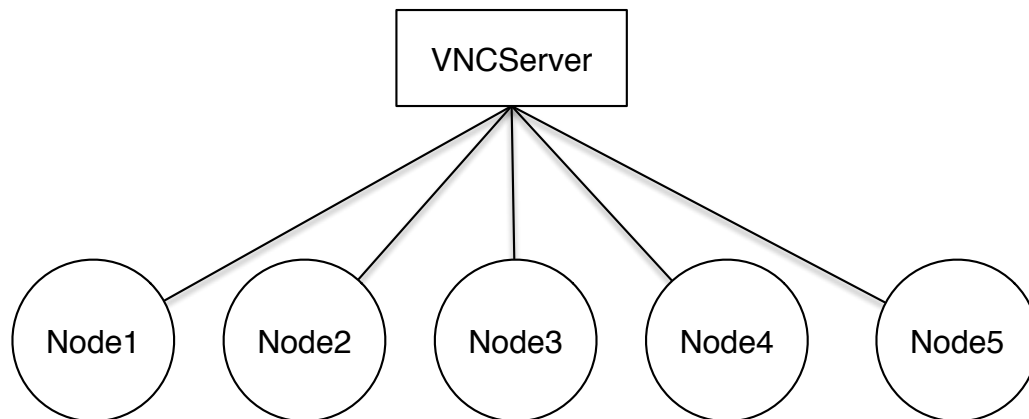


図 2.1: VNC

2.4 TreeVNC の構造

TreeVNC は Java を用いて作成された TightVNC(Tight Virtual Network Computing)[2] を元に作成されている。

TreeVNC は クライアント同士を接続させ、画面描画のデータを受け取ったクライアントが次のクライアントにデータを流す方式を取っている。また、サーバへ接続しに来たクライアントをバイナリツリー状に接続する (図 2.2)。バイナリツリー状に接続することで、 N 台のクライアントが接続しに来た場合、画面配信の画像データをコピーする回数は従来の VNC ではサーバ側で N 回する必要があるが、TreeVNC では各ノードが 2 回ずつコピーするだけで済む。

TreeVNC で通信される画像のデータ量は大きいため、大きなネットワークスループットが必要である。そのため、有線接続が必須である。

バイナリツリーのルートのノードを Root Node と呼び、Root Node に接続されるノードを Node と呼ぶ。Root Node は子 Node にデータを流す機能に加え、各 Node の管理、VNC サーバから流れてきた画像データの管理を行う。Node は 親 Node から送られたデータを 自分の子 Node に流す機能、逆に子 Node から送られてきたデータを 親 Node に流す機能がある。

2.5 TreeVNC の原理

TreeVNC のの原理を書く予定

- 従来の VNC : Node 数 * データ量
- TreeVNC : $(2(\text{子供の数}) + 1) * \text{データ量}$

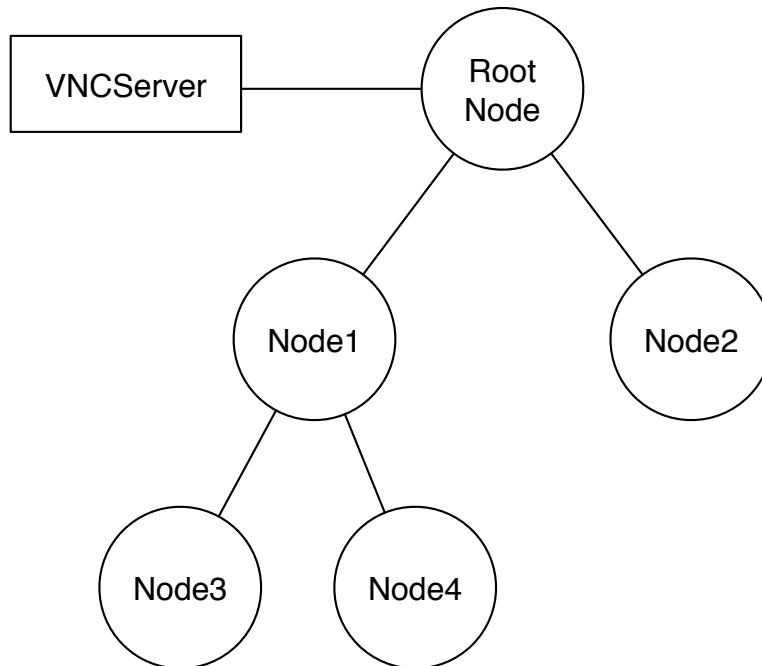


図 2.2: 構成される木構造

2.6 圧縮形式

TreeVNC は ZRLEE[3] というエンコードでデータのやり取りを行う。ZRLEE は RFB プロトコルで使えるエンコーディングタイプの ZRLE を元に生成される。

ZRLE は Zlib[4] で圧縮されたデータとそのデータのバイト数がヘッダーとして付けて送られてくる。Zlib は `java.util.zip.deflater` と `java.util.zip.inflater` で圧縮と解凍が行える。

しかし、`java.util.zip.deflater` は解凍に必要な辞書を書き出す (`flush`) ことが出来ない。そのため図 2.3 のように、Zlib 圧縮されたデータを途中から受け取ってもデータを正しく解凍することが出来ない。

そこで ZRLEE は一度 Root Node で受け取った ZRLE のデータを `unzip` し、データを `zip` し直して最後に `finish()` を入れることで初めからデータを呼んでいなくても解凍を行えるようにした (図 2.4)。

一度 ZRLEE に変換してしまえば子 Node はそのデータをそのまま流すだけで良い。ただし、`deflater` と `inflater` では前回までの通信で得た辞書をクリアしないとイケないため、Root Node と Node 側では毎回新しく作る必要がある。

2.7 通信経路

TreeVNC の通信経路として以下が挙げられる

- ある Node から Root Node に直接通信を行う send direct message (Node to Root)

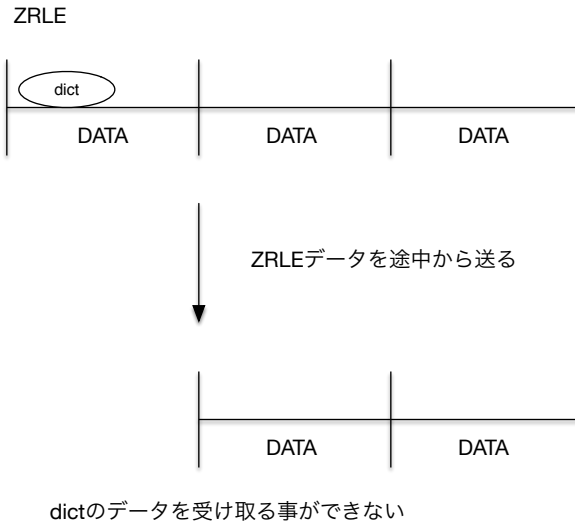


図 2.3: ZRLE での問題点

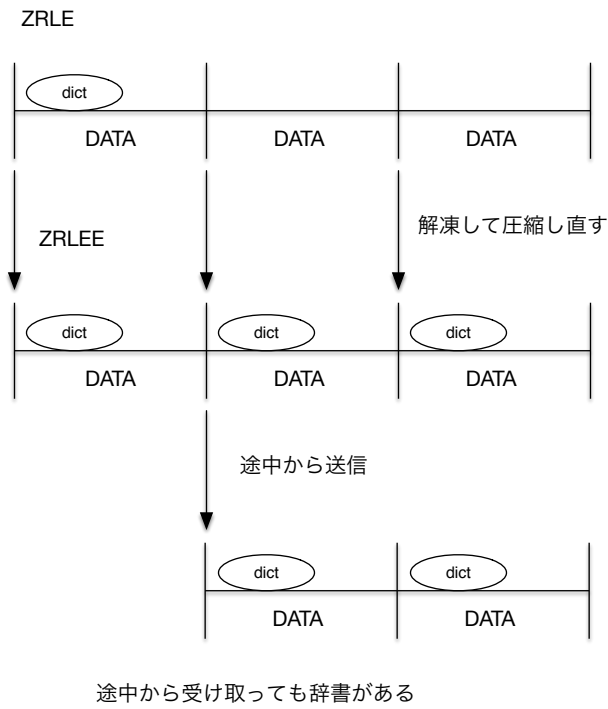


図 2.4: ZRLEE

- Root Node からある Node に直接通信を行う send direct message (Root to Node)
- Root Node から木の末端の Node までのすべての Node に通信を行う message down tree (Root to Node)
- ある Node から木構造を上に向かって Root Node まで通信を行う message up tree (Node to Root)
- Root Node から配信者の VNC サーバーへの通信を行う send message (Root to VNCServer)
- VNC サーバーから Root Node への通信を行う send message (VNCServer to Root)

2.8 ノード間で行われるメッセージ通信

RFB プロトコルで提供されているメッセージに加え、TreeVNC 独自のメッセージを使用している。TreeVNC で使用されるメッセージの一覧を表 2.1 に示す。

表 2.1: 通信経路とメッセージ一覧

通信経路	message	説明
send direct message (Node to Root)	FIND_ROOT	TreeVNC 接続時に Root Node を探す。
	WHERE_TO_CONNECT	接続先を Root Node に聞く。
	LOST_CHILD	子 Node の切断を Root Node に知らせる。
send direct message (Root to Node)	FIND_ROOT_REPLY	FIND_ROOT への返信。
	CONNECT_TO_AS_LEADER	左子 Node として接続する。接続先の Node が含まれている。
	CONNECT_TO	右子 Node として接続する。接続先の Node が含まれている。
message down tree (Root to Node)	FRAMEBUFFER_UPDATE	画像データ。EncodingType を持っている。
	CHECK_DELAY	通信の遅延を測定する。
message up tree (Node to Root)	CHECK_DELAY_REPLY	CHECK_DELAY への返信。
	SERVER_CHANGE_REQUEST	画面切り替え要求。
send message (Root to VNCServer)	FRAMEBUFFER_UPDATE_REPLY	画像データの要求。
	SET_PIXEL_FORMAT	pixel 値の設定。
	SET_ENCODINGS	pixel データの encodeType の設定。
	KEY_EVENT	キーボードからのイベント。
	POINTER_EVENT	ポインタからのイベント。
	CLIENT_CUT_TEXT	テキストのカットバッファを持った際の message。
send message (VNCServer to Root)	FRAMEBUFFER_UPDATE	画像データ。EncodingType を持っている。
	SET_COLOR_MAP_ENTRIES	指定されている pixel 値にマップする RGB 値。
	BELL	ビーブ音を鳴らす。
	SERVER_CUT_TEXT	サーバがテキストのカットバッファを持った際の message。

図 2.5 は TreeVNC で新しい Node が Root Node と通信し、木構造を形成するためのメッセージ通信の流れである。図 2.5 の手順として

- 接続を行う Node は Multicast 通信で Root Node に対して FIND_ROOT を送信する。
- Root Node が FIND_ROOT を受信し、FIND_ROOT_REPLY を送信する。
- Node 側で、どの Root Node に接続するかを選択するパネルが表示される。

- Node はパネルで接続する Root Node を選択し、Root に対して接続先を要求する WHERE_TO_CONNECT を送信する。
- 受信した Root Node は Node の接続先を CONNECT_TO で送信する。Node 3 が接続する場合、Root Node には既に2台の Node が接続している為、CONNECT_TO で指定する接続先は Node 1 となる。
- Node は Root の指定した接続先に接続しに行く。

を行い、木構造を形成する。

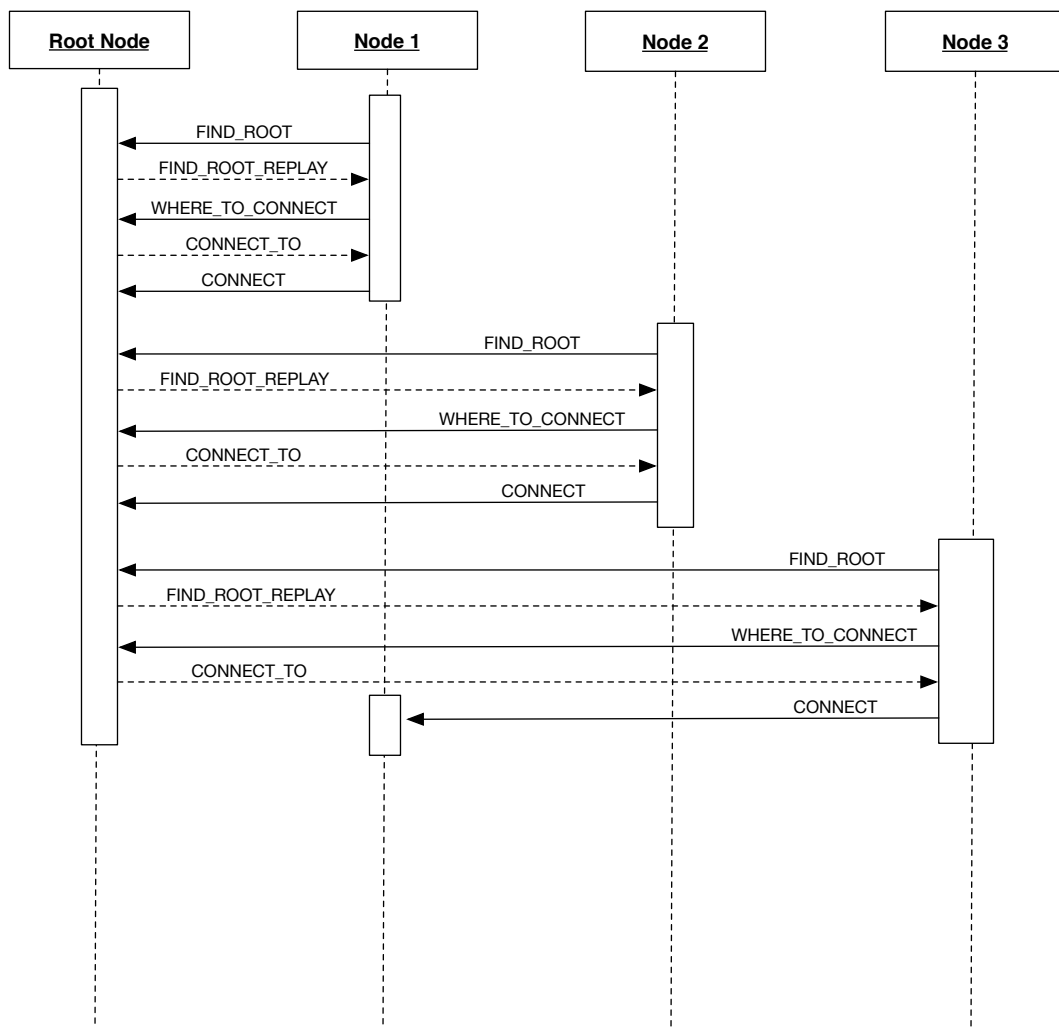


図 2.5: node 間で行われるメッセージ通信

2.9 MulticastQueue

配信側の画面が更新されると、VNCServer から画像データがFRAME_BUFFER_UPDATE メッセージとして送られる。その際、画像データの更新を複数の Node に同時に伝えるため MulticastQueue というキューに画像データを格納する。

MulticastQueue は `java.util.concurrent.CountDownLatch` を用いて実装されている。CountDownLatch は java の並列用の API で他のスレッドで実行中の操作が完了するまで、複数のスレッドを待機させることが出来るクラスである。CountDownLatch を初期化する際にカウントを設定することができる。このカウントはスレッドを開放する際に使用し、await メソッドでカウントが 0 になるまでメソッドをブロックする事ができる。

MulticastQueue は put メソッドを使用して データを queue に追加する。put の際に CountDownLatch をカウントダウンする。poll メソッドを使用することで Queue のデータを取得することが出来る。poll メソッドの実行の際に await メソッドが使われているため、次の put でデータが来るまでスレッドをブロックする。スレッドをブロックされた場合 新しいデータが put されると CountDownLatch がカウントダウンされるため、データの読み込みが再開される。

2.10 木の再構成

TreeVNC はバイナリツリーでの接続という特性上 Node が切断されたことを検知できずにいると、Node 同士で構成された木構造が崩れてしまい、新しい Node が接続に来た場合に適切な場所に Node を接続することができなくなってしまう。木構造を崩さないよう、Node 同士の接続を再構成を行う必要がある。

TreeVNC の木構造のネットワークポロジは Root Node が持っている nodeList というリストで管理している。つまり、Node の接続が切れた場合、木の再構成を行うため Root Node に知らせなければならない。

TreeVNC は LOST_CHILD というメッセージ通信で Node の切断を検知・木の再構成を行っている。

TreeVNC は VNC サーバーから送られる画像データ (FRAME_BUFFER_Update) を MulticastQueue に蓄積しており、Node はこのキューから画像データを取得し、画面を描画している。LOST_CHILD の検出方法はこの MulticastQueue を使用している。ある一定時間 MulticastQueue から画像データが取得されない場合 Memory Over Flow を回避するために Timeout スレッドが用意されている。Timeout を検知した際、Node との接続が切れたと判断する。

図 2.6 は 6 台の Node が接続してる状態で、Node3 が切断した場合の木の再構成を示している。

- Node3 の切断を検知した Node1 が Root Node へ LOST_CHILD メッセージを送信する (1: send LOST_CHILD)。

- LOST_CHILD メッセージを受け取った Root Node は nodeList から切断した Node を消し、最後尾の Node6 に切断した Node Number を割り当てる (2: update nodeList)。
- Root Node は最後尾の Node6 に、切断した子 Node3 が接続していた Node1 に接続する様に CONNECT_TO メッセージを送信する (3: send CONNECT_TO (Node1))。
- 最後尾の Node が子 Node を失った親 Node へ接続しに行く (4: connect (Node1))。

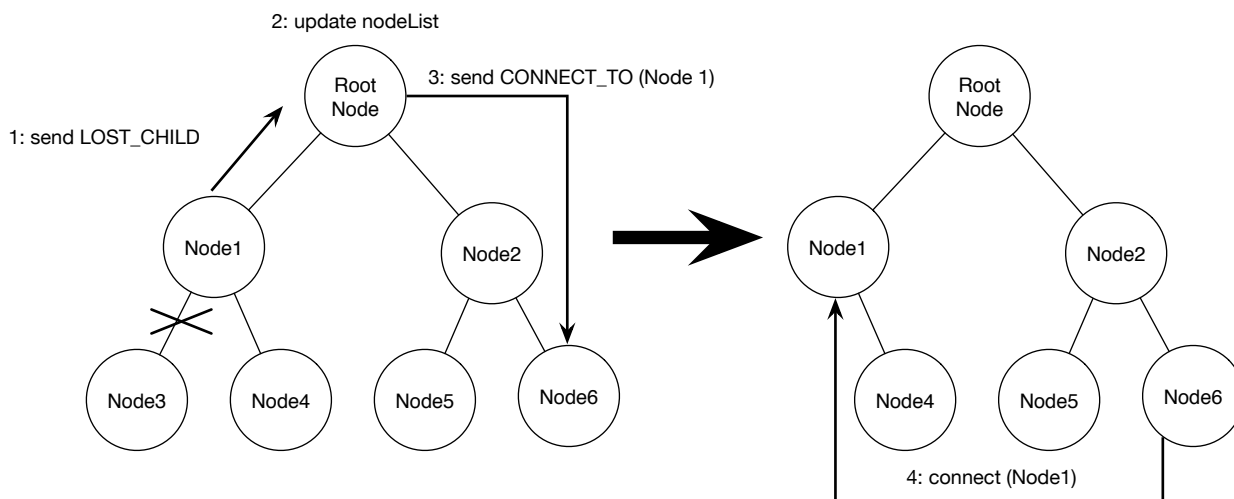


図 2.6: LOST_CHILD を検知・再接続

LOST_CHILD によって、切断された全ての Node を検知することができるため、nodeList の更新が正しく行われる。よって、新しく接続に来た Node を適切な場所に接続することが可能となる。

2.11 共有画面切り替え

ゼミでは発表者が順々に入れ替わる。発表者が入れ替わる度に共有する画面の切り替えが必要となる。

画面の共有にプロジェクトを使用する場合、発表者が変わる度にケーブルの抜き差しを行う必要がある。その際に、ディスプレイ解像度を設定し直す必要が出たり、接続不良が起こる等の煩わしい問題が生じることがある。

従来の VNC を使用する場合、画面の切り替えの度に一旦 VNC を終了し、発表者の VNC サーバーへと再接続を行う必要がある。

TreeVNC は配信者の切り替えの度に生じる問題を解決している。TreeVNC を立ち上げることで、ケーブルを使用する必要なしに、各参加者の手元の PC に発表者の画面を共有することができる。画面の切り替えはユーザが VNC サーバーへの再接続を行うことな

く、ビューアの Share Screen ボタンを押すことによって、配信者の切り替えを行うことができる。

TreeVNC の Root Node は配信者の VNC サーバーと通信を行っている。VNC サーバーから画面データを受信し、そのデータを子 Node へと送信している。配信者切り替え時に Share Screen ボタンが押されると、Root Node は Share Screen ボタンを押したクライアントの VNC サーバーと通信を始める。そのため TreeVNC は配信者切り替えの度に VNC を終了し、再接続する必要がない。

2.12 複数のネットワークの対応

従来の TreeVNC は、クライアントの接続する木構造が単一であった。そのため、Root Node が複数のネットワークに接続していても、単一のネットワークでしか使用することができなかった。

この問題を解決するために、図 2.7 の様に、ネットワーク別に木構造を形成するように設計した。

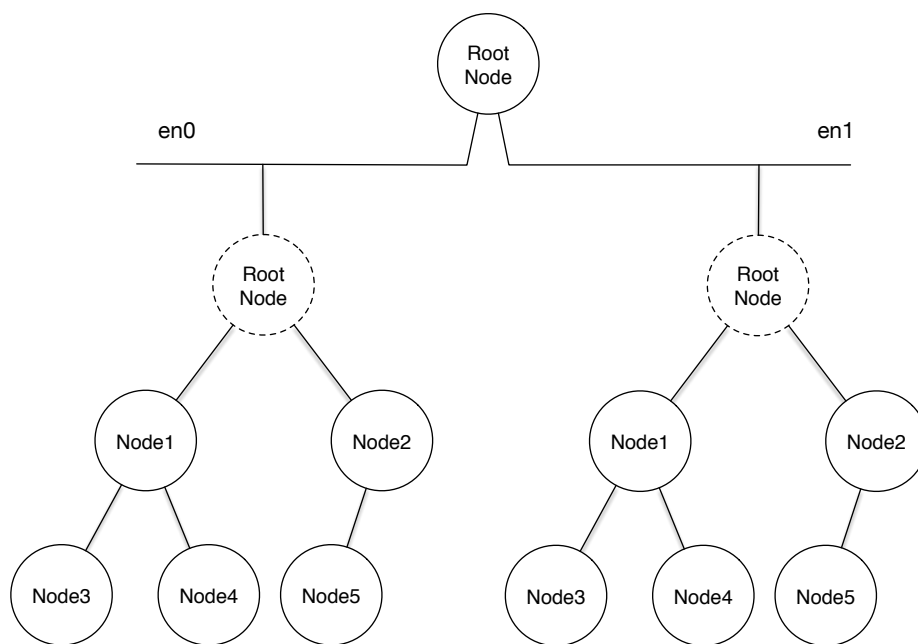


図 2.7: Multi Network Tree

TreeVNC は Root Node が TreeManager というオブジェクトを持っている。TreeManager は TreeVNC の接続部分を管理している。TreeManager では木構造を管理する nodeList が生成される。この nodeList を元に、新しい Node の接続や、切断検出時の接続の切り替え等を行う。

Root Node の保持しているネットワーク毎に TreeManager を生成する用に変更を行った。新しい Node が接続してきた際、interfaces から Node のネットワークと一致する

TreeManager を取得し、Node 接続の処理を任せる。そのため、TreeVNC が複数のネットワーク別に木構造を構成することが可能となる。

第3章 NAT 対応

3.1 DirectConnection

遠隔地からでもゼミや授業に参加できるように、NAT を越えたネットワークから TreeVNC への接続を可能にした。

図 3.1 に NAT を越えたネットワークからの接続を示す。別ネットワークから TreeVNC に参加する際、直接配信側のネットワークの Root Node に接続を行う。この接続を Direct Connection と呼ぶ。

Direct Connection した Node はそのネットワークの Root Node になる。そのネットワークの他の Node はそのネットワークの Root Node に接続し、木構造を生成する。

配信側の Root Node は Direct Connection で接続された Root Node に対して Framebuffer Update で 画像データを送信する。Framebuffer Update が送信された Root Node は そのネットワークの Node に対して Framebuffer Update を送信する。

これにより、NAT を越えたネットワークの画面共有が可能となる。

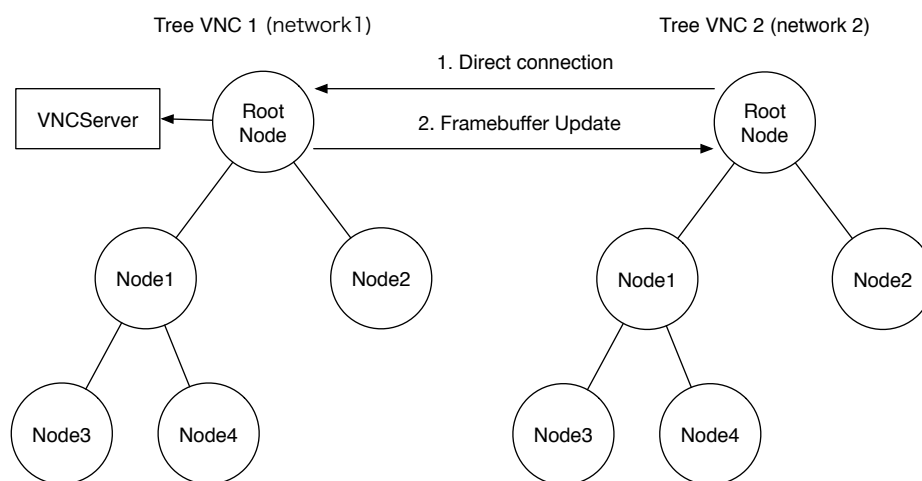


図 3.1: 遠隔地 Node からの接続

第4章 TreeVNC の追加機能

4.1 マルチディスプレイ対応

画面配信側の PC がマルチディスプレイの場合 VNC サーバーからは複数の画面全体の画像データが送信されてしまう。授業やゼミ等で TreeVNC を使用する場合、複数画面の表示は必要ない。そこで、画面を共有する際、ディスプレイを選択させ、画面共有を行う機能を追加した。

ディスプレイの情報は個々のクライアントでしか取得ができない。そのため、配信側は画面の切り替えを行う際に、ディスプレイを選択し、そのディスプレイの左上と右下の座標を取得する。その座標を Root Node への画面切り替えを要求する `SERVER_CHANGE_REQUEST` メッセージに付加させる。Root Node は配信側の VNC サーバーに画像データを要求する `FRAMEBUFFER_UPDATE_REPLY` メッセージに送信された座標を付加する。VNC サーバーは要求された座標内の画像データを `FRAMEBUFFER_UPDATE` メッセージで Root Node に送信する。これにより、一画面のみの表示が可能になる。

図 4.1 は `Display1` のみを画面共有する例を示している。

4.2 画面切り替えの安定化

画面切り替えを行う際、配信中の画面を停止した後に画面の切り替え処理を実行していた。しかし、切り替え先の VNC サーバーへの接続に時間がかかったり、切り替え先の設定ミスなどで画面の切替がスムーズに行えない場合があった。

そこで、画面切り替えを行う際に新しく切り替え用のスレッドを生成し処理する変更を行った。Root Node は `SERVER_CHANGE_REQUEST` を受け取ると、配信状態を維持したまま、画面切り替え用に新しくスレッドを生成する。切り替え用のスレッドは切り替えに必要なデータの設定、VNC サーバーへの接続など通常の切り替え処理を実行する。切り替えが完了した後に、現在配信中の画面を停止し、画面の切替を行う。切り替え用のスレッドを用意することで、配信状況を維持したままスムーズな画面切り替えが可能になった。

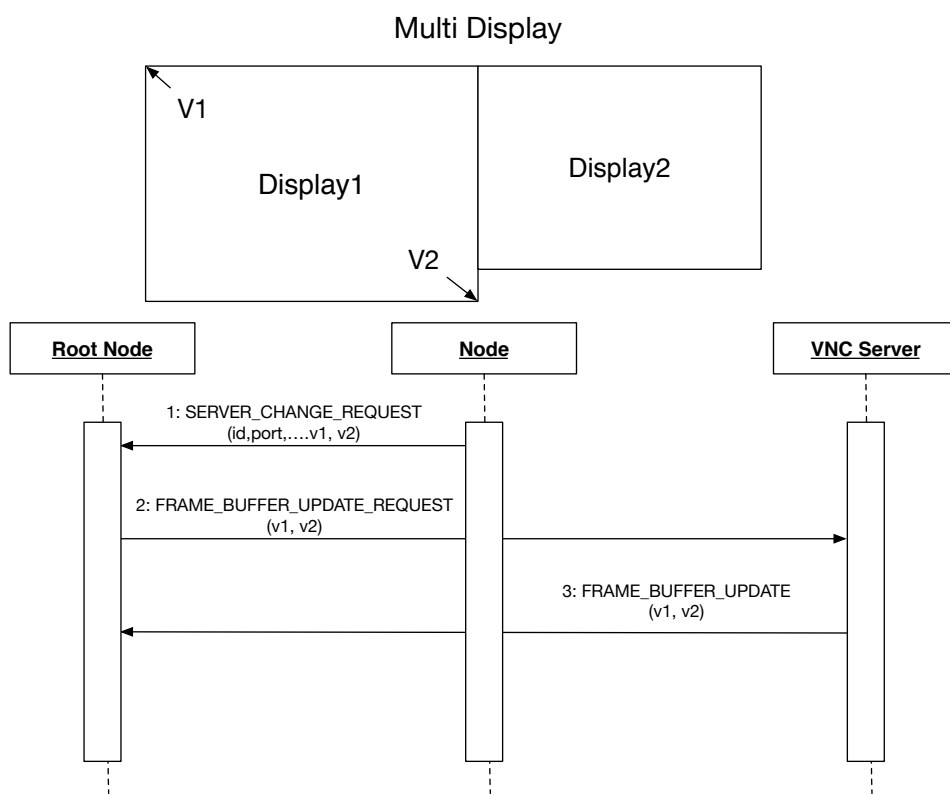


図 4.1: マルチディスプレイへの対応

4.3 ネットワークになっているノードへの対処

4.4 クライアントへのエラー通知

TreeVNC には接続しているクライアントへのエラーの通知を行うことが出来なかった。そのため、画面切り替えを行う際に切り替え先が VNC サーバーの共有設定をしていない場合 Root Node に接続エラーのダイアログが表示されるという実装になっており、切り替えを行ったクライアントには通知されていなかった。

この問題を解決するために新しく `ERROR_ANNOUNC` というメッセージを追加した。`ERROR_ANNOUNCE` メッセージは Root Node から木構造を辿りながら末端の Node に通信を行うメッセージで、エラー通知したいクライアントの ID と エラー内容の文字列を付加して送信する。付加した ID に一致するクライアントがメッセージを受け取ると、付加されたエラーの文字列をダイアログで表示する。エラー通知用のメッセージを追加することで、各々のクライアントに対して通知を行うことが可能になった。

第5章 TreeVNC の評価

5.1 画像データ伝達の遅延

VNC サーバー から受信する画像データ、TreeVNC で扱われるメッセージ通信は構成された木を伝って伝達される。接続する人数が増える毎に木の段数は増えていく。そこで Root Node から木の末端の Node までの画像データ伝達の遅延を検証する実験を行った。

5.2 実験環境

授業を受講している学生が TreeVNC を使用した状態で実験を行った。TreeVNC には最大で 17 名が接続していた。

5.3 メッセージを使用した実測

TreeVNC を伝搬するメッセージに、CHECK_DELAY、CHECK_DELAY_REPLY を追加した。CHECK_DELAY は Root Node から 末端の Node まで伝達するメッセージと画像データ、CHECK_DELAY_REPLY は各 Node から Root Node まで伝達するメッセージである。

CHECK_DELAY メッセージは送信時刻を付けて送信する。Root Node から CHECK_DELAY 送信し、末端の Node まで各 Node を伝いながら伝達して行く。

CHECK_DELAY_REPLY は CHECK_DELAY から受け取った送信時刻をそのままに、画像データのサイズを付けて送信する。CHECK_DELAY を受け取った各 Node は CHECK_DELAY_REPLY を接続している親 Node に送信する。

CHECK_DELAY_REPLY を受け取った Root Node はメッセージと画像データの伝達にどれだけの時間がかかったかを計算する。データ計算方法を以下の Code 5.1 に記述する。この変数 time は CHECK_DELAY_REPLY に付いている CHECK_DELAY の送信時刻である。

```
1 Long delay = System.currentTimeMillis() - time;
```

Code 5.1: 遅延時間の計算方法

5.4 結果

バイナリツリーで木を構成した場合、Node 数が 17 台だと深さが 4 となる。各木構造の階層毎に、画像データの伝搬にかかった時間を測定した。

図 5.1 は遅延の分布を示した散布図である。X 軸はメッセージ伝達にかかった秒数 (ms)、Y 軸は画像データのサイズ (Byte) である。

画像データの伝達はほぼ 1 秒以内に収まっているが、容量が小さい場合でも時間がかかる場合がある。それはその送信の前に大容量の画像を送信した後の回線の Delay が残っているためだと考えられる。

また、深さ 3 で極端に遅い場合がある。遅い原因として、1 つの Node がボトルネックになっていることが判明している。このような極端に遅い Node をそのまま木に配置した場合、その Node の子 Node 以下に影響を及ぼす場合がある。そのため、遅い Node を検出して、木の最後尾に移動させる機能が必要である。

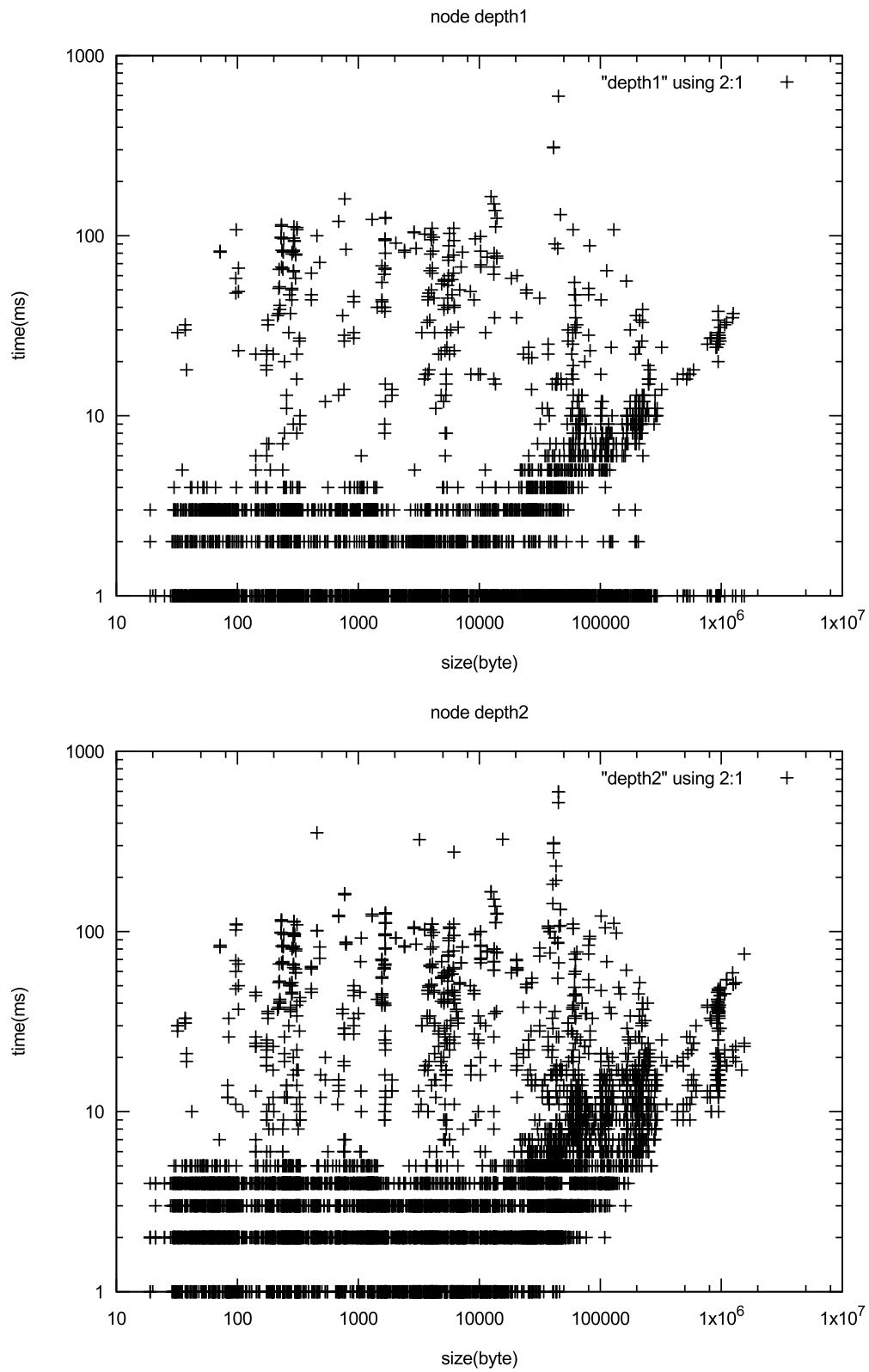


図 5.1: 深さ 1,2 のデータサイズと遅延の関係

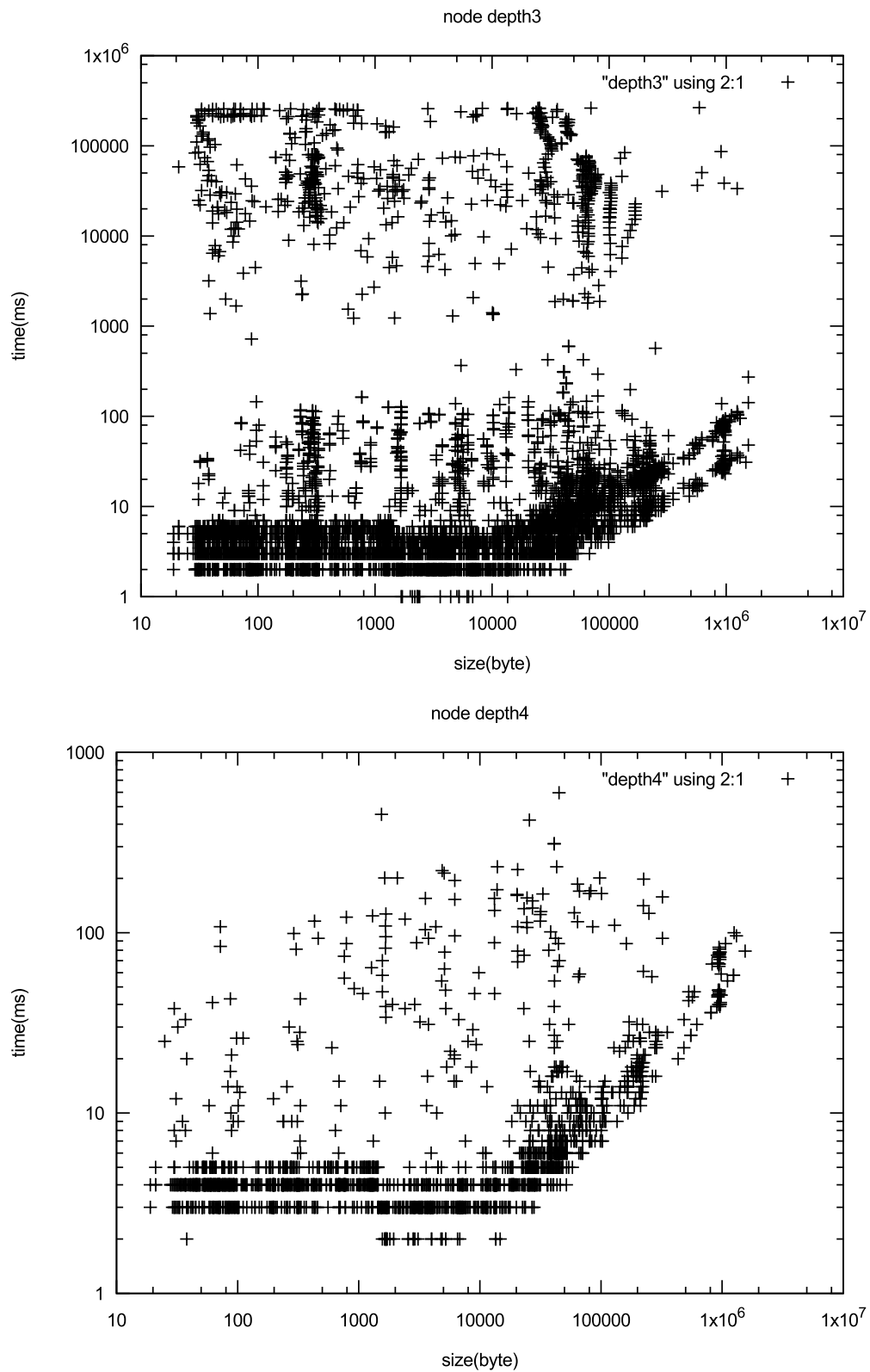


図 5.2: 深さ 3, 4 のデータサイズと遅延の関係

第6章 まとめ

6.1 NATを越えた画面切り替え

6.2 新機能の評価

参考文献

- [1] RICHARDSON, T., AND LEVINE, J. The remote framebuffer protocol. rfc 6143, mar 2011.
- [2] TightVNC Software. <http://www.tightvnc.com>.
- [3] Yu TANINARI and Nobuyasu OSHIRO and Shinji KONO. Vnc を用いた授業用画面共有システムの設計・開発. 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 2012.
- [4] LOUP GAILLY, J., AND ADLER, M. zlib: A massively spiffy yet delicately unobtrusive compression library. <http://zlib.net>.
- [5] RICHARDSON, T., STAFFORD-FRASER, Q., WOOD, K. R., AND HOPPER,. A. virtual network computing, jan 1998.
- [6] Surendar Chandra, Jacob T. Biehl, John Boreczky, Scott Carter, Lawrence A. Rowe. Understanding screen contents for building a high performance, real time screen sharing system. *ACM Multimedia*, Oct 2012.
- [7] Yu TANINARI and Nobuyasu OSHIRO and Shinji KONO. Vnc を用いた授業用画面共有システムの実装と設計. 日本ソフトウェア科学会第 28 回大会論文集, sep 2011.
- [8] Tatsuki Iha and Shinji KONO. 有線 lan 上の pc 画面配信システム treenvnc の改良. 第 57 回 プログラミング・シンポジウム, jan 2016.

謝辞

本研究の遂行，また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 hoge 助教授に深く感謝いたします。

また、本研究の遂行及び本論文の作成にあたり、日頃より終始懇切なる御教授と御指導を賜りました hoge 教授に心より深く感謝致します。

数々の貴重な御助言と細かな御配慮を戴いた hoge 研究室の hoge 氏に深く感謝致します。

また一年間共に研究を行い、暖かな気遣いと励ましをもって支えてくれた hoge 研究室の hoge 君、hoge 君、hoge さん並びに hoge 研究室の hoge、hoge 君、hoge 君、hoge 君、hoge 君に感謝致します。

最後に、有意義な時間を共に過ごした情報工学科の学友、並びに物心両面で支えてくれた両親に深く感謝致します。

2010年3月

hoge