

実習用パソコンサーバのフォールトトレランス実現の一手法

松 山 実[†] 横 井 利 彰[†]

本論文では、情報教育の実習用に設置されたパソコン環境下で、LAN を介して学生が端末から提出するレポートファイルをパソコンのレポートサーバに受け付ける場合のフォールトトレランスの必要性について論じ、その実現技法について報告する。まず、フォールトトレランスの水準の設定と機器構成を電源、伝送路、サーバ本体とディスクについて考察した。その結果に基づき、無瞬断電源装置を設置し、2台のパソコンをサーバとして用いることにした。端末からは同報通信により、2台のサーバに同一内容のファイルを記録するようにするためのソフトウェアを開発した。サーバと端末間の同期をとるため、サーバ同士の通信が必要になった。このため、フォールトトレランス実現以前より、学生用端末からのレポート提出における応答速度は低下したが、学生には感知できるほどではなかった。実運用におけるフォールトトレランスの有用性はまだ実証されていないが、2台のサーバが動作中に1台を停止させても、残りの1台でサーバ機能が継続できることを実験的に確認した。

Fault-Tolerance of PC-Server for Computer-Lab

MINORU MATSUYAMA[†] and TOSHIAKI YOKOI[†]

This paper discusses the necessity of fault tolerance for PC server receiving report files through LAN from student-use PC-terminals in a computer laboratory, and reports a methodology to achieve the fault tolerance. First, the level of fault tolerance was discussed, following the equipments adopted in the present work. An uninterruptible power supply and two PC servers were exploited. A software system was developed to record a same file into a disk of each server through multi-address-communication from a terminal. In order to synchronize a terminal with servers, communication between the two servers was needed. Consequently, the response was slightly deteriorated compared to the similar system without fault tolerance, although students were not aware of it. During the approximately one-year operation, the effectiveness of fault tolerance has not been proved. It was confirmed experimentally that the server function was able to continue after one of two servers was suspended.

1. はじめに

情報教育の目的の1つに基礎的情報活用能力の育成が挙げられ、その一環としてのプログラミング教育の重要性も広く認識されている¹⁾。そのための実習設備として多くの教育機関でコンピュータシステムを導入しているが、最近ではパーソナルコンピュータ（以下、パソコン）あるいはワークステーションを導入する例が多い。ただし、多数台を設置しなければならない教育用では主に経済的理由により、さらには、学生が個人的に所有するパソコンとの操作性とファイルの互換性から、多くの場合パソコンが選択されている²⁾。

ところで、プログラミング教育では、学生に課題を出して、その課題に沿ったプログラムを作成させ、レ

ポートとして提出させることの教育的意義も指摘されている³⁾。しかし、学生が多数の場合、その受付をどのように行うかは、受付自体の手間と受け付けた後の教員の作業負担に大きく影響する。レポートの受付媒体・方法は様々あるが、ここでのレポートが通常の実験レポートのように日本語等の自然言語で記述されたものではないため、内容を把握することは経験豊かな教員でも困難な場合が少なくない。そこで受付後の処理、すなわちプログラムの動作確認が容易に行える受付方法を探る必要がある。そのため、筆者らは学生が直接操作するパソコンからLANを介してレポートサーバにソースプログラムファイルを受け付けるシステムを開発し、運用してきた³⁾。

サーバとしては汎用機、ワークステーション、パソコンのいずれかを用いることが考えられるが、ここでは、学生用端末と同種類のパソコンを用いている。その理由は、レポート受付の締切後に、受け付けたプロ

[†] 武蔵工業大学情報処理センター
Information Processing Center, Musashi Institute
of Technology

プログラムの動作確認を学生用端末と同じ環境で行うためと、サーバ用のパソコンで動作確認を行えば、ファイル転送等の余分な操作をしなくて済むためである。

もしサーバが1台しかなく、それが故障した場合は授業にも支障を生ずる。殊にレポートという学生の成績に直接関連するような情報が格納されているサーバが故障し、提出したレポートが消失するという事態に至れば、学生の勉学意欲を著しく損なうことは容易に想像される。そのため、サーバにフォールトトレランスが求められる。しかし、パソコンは元来個人的利用を目指して設計・開発されているため、フォールトトレランスは考慮されていない。ただし、2重のディスクを備え、ミラーリングを行うことによりフォールトトレランスを実現したサーバ用途のパソコンが、最近、市販され始めたが、まだ高価である。また、CPUは高性能であるが、1つなので故障した場合は動作不能になる。LANへは1本のケーブルで接続されるため、筆者らが過去に経験した、トランシーバ自体の故障による信号の不通にも対処できない。

そこで、ミラーリング機能を持たない通常のパソコン2台をサーバとして用いて、ハードウェアのフォールトトレランスを安価に実現する技法を研究し、レポート受付システムとして具体化することにした。本論文ではその実現技法について報告する。

以下、2章ではフォールトトレランスの設計方針と機器構成の関係を、電源、伝送路、サーバ本体とディスクに分けて概説する。3章では、レポート受付システムとして開発したソフトウェアの構成と機能の概要を述べ、続けて4章では、プログラムの動作、およびサーバと端末間のデータ交信ならびに2台のサーバ間で同期をとるためのデータ交信について説明する。5章では、開発したシステムの応答速度の実験結果と実際の運用状況について報告する。

2. フォールトトレランスの設計方針と機器構成

「フォールトトレランス」の定義は現時点で必ずしも統一されていないが、フォールトへの対応の仕方による水準は、高い順からほぼ次のように分けられる⁴⁾。

- (1) フォールトマスキングの水準
- (2) システム機能を回復する水準
- (3) 機能が停止した場合の状態を安全側に保証する水準
- (4) データの完全性を保証する水準

これら(1)～(4)のうち、(1)は発生したフォールトを外部から遮蔽し、機能が停止することなく正常に継続する最も高度な水準である。本研究におけるレポートサーバではこの水準を目指す。これは、受け付けたレポートの消失を防ぐだけであれば上記の水準(4)で十分であるが、授業への支障を生じないようにするためである。すなわち、本研究での「フォールトトレランス」とは、サーバの故障を学生に感知させることなく、レポート提出・受付機能が継続できる性質を意味し、雑音などによる通信路符号の誤りの検出・訂正などを意味するものではない。

フォールトトレランスの実現には冗長性が必要であり、冗長性は機器等の多重化により確保されることが多い。多重度を上げればフォールトトレランスは高まるが、経済的理由から、2重化で済ませることが多い。さらに、機器の配置場所、伝送路の長さや経路等により、また経済的理由により2重化をフォールトの発生頻度の高い機器のみに限定する場合もある。そこで、本報告でのサーバを動作させるために必要な系を、電源、伝送路、サーバ本体とディスクの3種類に分け、各々の2重化の必要性を考察した。その結果として採った機器構成を図1に示す。図1中の「管理用」とは、掲示板サーバおよびレポートサーバ中のファイル内容の表示と更新、あるいは、遠隔操作でサーバ動作を停止させたり、サーバの電源切断等を行うための職員用のパソコンである。これには、通常は職員がデータ処理等に使用している数台のパソコンのいずれかを当てており、特定の1台ではない。また図1には、掲示板サーバとレポートサーバの2種のサーバを示してあるが、以降での「サーバ」は特に断らない限り本報告の主題であるレポートサーバを意味する。次に、図1の機器構成を採った理由をフォールトトレランスの設計の観点から説明する。

① 電源

電源システムの2重化は、少なくとも異なる変電所からの

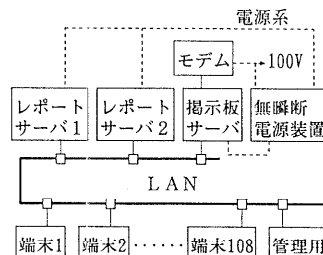


図1 レポート受付システムの機器構成
Fig. 1 Apparatus for report-reception system.

電力線を引き込まない限り、停電への対策にはならないことが多いが、それには莫大な費用を伴う。図1中の機器はすべて同一建物内にあり、停電時には端末も使えなくなるため、停電以後、サーバのみを長時間動作させる必要はない。そこで電源系統の2重化の代わりに、停電以後数分間、サーバに電力を供給させるための無瞬断電源装置を設置した。ただし、掲示板サーバ⁵⁾に接続されたモデムは直接100Vコンセントを電源としている。したがって停電と同時にモデムは動作しなくなるが、3台のサーバは無瞬断電源装置からの電力供給を受けて動作し続ける。掲示板サーバに定期的にモデムの状態を監視させ、モデムが動作状態でなければ停電と見なし、レポートサーバに通報させる。それを受信したレポートサーバは、RAMディスク上のファイルをハードディスクに退避し、サーバ機能を停止後、自らの電源切断などの事後処理を行うようにさせることにした。すなわち、ここでのモデムは単に停電監視のセンサとして利用するだけであり、モデムである必要はない。モデムは消費電力が少なく、機械的に作動する部分がないので、故障確率が低いと判断したため、利用したにすぎない。

無瞬断電源装置自体の故障に対処するには、サーバそれぞれに独立して設置すべきであるが、装置の性格上、故障頻度が低いと思われたことと、設置面積を節約するため、1台のみにした。

② 伝送路

ここでの伝送路は、同一建物内に設置された学生用端末とサーバ間の総延長数百mのイーサネット系10BASE5のLANケーブルであるが、建物工事などの特別な場合を除き、機械的振動を受けることはない。また、職員が関知しない間に、ケーブルにトランシーバの取り付け工事が行われて短絡事故が起きることも考えられないため、伝送路の2重化は不要とみなした。

③ サーバ本体とディスク

レポートサーバの運転時間は、学生用端末の利用時間と同じく、通常9時から18時までである。この間に発生したフォールトに対し、上記の水準(1)が維持できれば、目的は達成されたことになる。そこで、学生用端末と同じ種類のパソコン2台をレポートサーバとして用いることにし、LANへは、複数ポートのトランシーバではなく、2個の単一ポートのトランシーバで各々のサーバを接続することにした。

2台のサーバのうち1台が故障した場合でも、残り

の1台でサーバ機能を継続させるには、端末から送信されたレポートファイルをサーバが2台ともそれぞれのディスクに記録しておく必要がある。そのため、端末から2台のサーバへは同報通信でファイルを送信することにした。端末からのファイルを受信している間は、各々のサーバは、互いに独立に、受信内容をそれぞれのディスクに書き込むようにするが、ファイル受信に先立って、サーバ間の交信を行うようにする。これは2台のサーバの動作速度の差異を吸収し、同期をとるためである。

このように2台のサーバを用いれば、1台が故障しても、故障機を伝送系からはずして故障原因を調べることもできるし、代替機を用意することもできる。ただし、代替機あるいは修理後の機器を、運用中の系に接続し直し、サーバとして復帰させるための機能は持たせないことにした。すなわち、その日の残りの運用は1台のみのサーバで行う。これは1日の運用が通常18時までであり、その間にサーバが2台とも故障する確率は非常に低いと判断したためである。さらに、サーバとして復帰させる機能を省けば、その分プログラム開発が容易になるからである。したがって、1台が故障した場合は、運用時間終了後、代替機等へのファイルの回復作業を行い、翌朝からの2台のサーバによる運用に備える、という方法を採用することにした。

なお、1台のサーバがケーブル端子の接触不良などにより一時的に通信不能になる事態も考え得るが、筆者らが過去数年間運用してきたLAN利用のシステム^{3),5)}では経験しなかったため、起きる確率が低いと想定した。そのため、そのような事態が生じた場合の復帰機能はここでは持たせず、将来の検討事項として残すことにした。

以上の無瞬断電源装置、モデムおよび3台のサーバは大型汎用機と同じ室内に設置した。この部屋は温度と湿度がほぼ一定に保たれ、かつ、普段は施錠されているため、故障要因の削減、およびサーバに対する予期せぬ行為の防止という観点から望ましい設置場所と言える。

ところで、教育用システムではコンピュータの常識を知らない初心者の行動に対処できることが重要な要素となる。例えば、ファイルアクセス中にリセットをかけたり、フロッピーディスク装置のレバーを上げたりした場合への対処である。もし、1人の学生がレポート提出のためのファイルアクセス中にこれらの行

為をとれば、当然レポートは提出できないが、それはその学生の責任であろう。しかし、その行為がサーバ動作に異常をもたらし、他の学生がレポート提出できないということでは、せっかくのフォールトトレランスの導入も意味が薄れる。筆者らもこのような事態を想定し、従来からシステムを開発してきた⁵⁾。例えば、サーバがファイルを受信中、つまり、ファイル終端記号を受信する前に後続のパケットが一定時間以上経過しても受信されない場合は、そのファイルを破棄し、他のパソコンからのメッセージの受信待ち状態に戻るようにした。プログラム開発後、端末のフロッピーディスクからサーバにファイルを転送している間、端末に対し、リセットをかけたり、フロッピーディスク装置のレバーを上げたりする行為を加えたが、その後もサーバ機能が継続でき、他のパソコンからのファイルを正常に受信できることを確認した。このように、サーバ機能を維持できるようにシステム設計することは、本報告でのフォールトトレランスとは直接関係ないが、教育用では重要なことと考える。

また、教育用ではシステム破壊等の行為に対する配慮も欠かせない。端末側のファイルの削除だけならば、端末がパソコンとして動作しなくなったり、あるいはレポートが提出できなくなるだけであり、サーバには影響ない。削除しないまでも、テキスト形式のファイルは容易に改変できる。そのため、端末画面に表示する情報の多くはテキストファイルではなく、実行形式プログラム中にデータとして記述することにした。また、パソコンではシステムタイマが容易に変更できる。そのため、サーバ側のタイマを基にレポート締切日を調べ、その日に受け付けるレポートの授業コード・レポート番号・締切日をデータとして送信して端末画面に表示する。さらに、サーバが受け付けたレポートのファイル作成日時は、サーバのタイマで決まるようにする。このようにすれば、端末のタイマが変更されても、レポートの締切日や受付日時に影響はない。なお、授業コードとは、科目名・担当教員・曜日・時限を識別するために授業単位ごとに振られた一連のコードであり、配付資料と掲示物で学生に周知してある。

ところで、端末側からのハッカー的行為によりサーバが影響を受けることも考え得るが、過去数年間運用した LAN 利用のシステム^{3), 5)}では経験しなかった。これは端末の設置場所が同一建物内の 2 教室に限定されており、両教室には学生の目に付きやすい位置に監視

用のテレビカメラが備えられているためとも思われる。将来 LAN が延長され、職員の監視できない場所からアクセス可能になった場合は情報の暗号化など、システムの保護に関する措置が必要になるが、ここでは特別な手立ては採らないことにした。

3. レポート受付システムの構成プログラム

ここでのレポート提出・受付システムでは、パソコン間のデータ通信を行わなければならない。そのため基本ソフトウェアとして、MS-DOS でマルチタスク機能、および、LAN で接続された複数パソコン間でのプロセス間通信機能を実現する、メーカ提供のネット BIOS に相当するソフトウェアを使用した⁶⁾。レポート提出・受付システムの開発には C 言語を用い、この基本ソフトウェアが提供する C 言語インタフェースライブラリとリンクした。したがって、ここではネットワーク OS は利用していない。

開発したプログラムは、次の (a)～(d) の 4 種類に大別される。

(a) 端末側プログラム (基本部分)

これは、サーバと通信を行って、レポート受付情報などのデータを得たり、レポート提出時のレポート用ファイルのサーバへの送信、あるいは学生が提出済のレポート内容を確認したい場合のサーバからのファイル受信などを主要機能として持つ。サーバが 2 台あるため、サーバへのデータ送信はすべて同報通信で行うようにした。

また、サーバとの通信機能以外に、学生のファイル名等の入力操作を容易にするためのラインエディタやファイル名の一覧表示と選択機能、提出内容確認時のレポート内容の画面への表示と上下のスクロール機能など、操作性の向上を目的とした付随的機能を含む。

この端末側プログラムは、108 台の端末に対し、すべて同一内容である。

(b) 端末側プログラム (提出ファイルの内容検査)

これは学生が提出しようとするファイル内容に対し、端末側で簡易的な構文検査などを行い、提出条件に合わない場合は、画面にその旨を表示するとともに、サーバへのファイル転送が起きないようにするためのプログラムである。また、レポートプログラムの記述言語に応じてコンパイルを行い、さらに、リンク・実行して、各段階での結果を画面に表示するとともに、提出する可否かを学生に問い合わせる。この端末側プログラムは上記 (a) の子プロセスとして動作

する。

このプログラムも、108 台の端末に対し、すべて同一内容である。

(c) サーバ側プログラム

このサーバ側プログラムは 2 台のレポートサーバに対して同一であり、次の機能を有する。

- ① レポートを受付中の授業コード、レポート番号、締切日の端末への送信。
- ② 端末から受信した学籍番号とパスワードの照合とその結果の端末への返信。なお、学籍番号とパスワードは、学期初め、学生にマークカードにマークさせたものを、ファイルとしてサーバに格納してある。
- ③ レポート受付動作としての、端末からのファイル受信とディスクへの格納
- ④ 受付済レポートを学生が確認する場合の端末へのファイル送信
- ⑤ あらかじめ設定した時刻あるいは掲示板サーバから停電時の通報を受信した時点で、RAM ディスク上ファイルのハードディスクへの退避、サーバ機能の終了とサーバ自身の電源切断
- ⑥ 2 台のサーバが、互いの相手サーバが動作状態にあるか否かを確認するためのサーバ間の交信、および、そのための LAN 上アドレスの取得

なお、サーバ側プログラムは、これら①～⑥の他に次の管理用プログラムに対応する機能を含む。

(d) 管理用プログラム

これは、図 1 中の「管理用」のパソコンからサーバ中のファイルの管理などを遠隔操作で行うためのプログラムで、次の機能を持つ。

- ① レポート受付期間を設定したファイルの内容表示と更新
- ② 授業コードごとの学籍番号・パスワードファイルの内容表示と学籍番号・パスワードの追加
- ③ 授業コードごとの科目名・クラス名ファイルの内容表示と更新
- ④ レポートを提出した学生の学籍番号、そのファイル容量、提出日時を表示
- ⑤ サーバの動作の強制終了あるいは電源切断

4. 開発したプログラムの動作

図 2 に、レポート提出の場合のサーバ側プログラムと端末側プログラムの主な動作の流れ、および両者間のデータ交信の様子を示す。

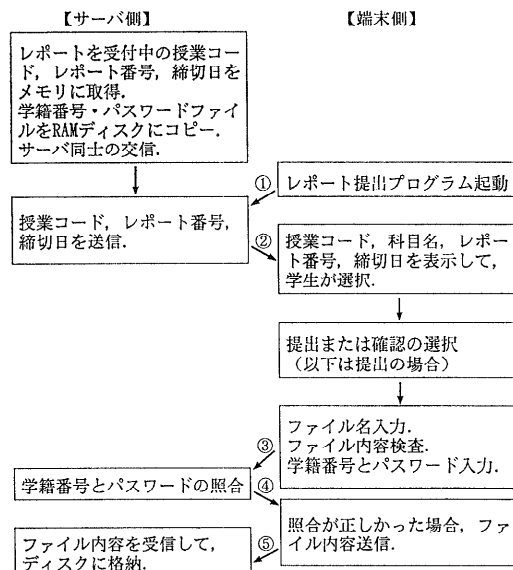


図 2 サーバと端末間の主なデータ交信と動作の流れ
Fig. 2 Flow of programs and data communication between a server and a terminal.

学生が端末の利用を開始する前に、サーバの電源を投入して、サーバ用のプログラムを起動しておく必要があるが、職員が毎朝の出勤直後に行っている。起動直後、サーバはハードディスク中のレポート受付期間設定ファイルを読み出し、その日にレポートを受け付ける授業コード、レポート番号、締切日をメモリに保持する。次に、授業コードごとの学籍番号・パスワードファイルを RAM ディスクにコピーする。これは、端末から送信されてきた学籍番号とパスワードの組合せを、サーバに登録されているものと照合するときのファイル読み出しを速くするためである。

さらに、サーバ各々が LAN 上のアドレスを取得して、自身がレポートサーバ 1 か 2 かを認識する。また、この時点では、互いの相手サーバが動作状態であると仮定したフラグを設定する。次に、サーバ同士が相互に交信して相手か動作状態か否かを調べる。そのアルゴリズムを図 3 に示す。

サーバが 2 台とも動作状態の場合、図 3 に示すように、自身が SV 1 (サーバ 1) ならば SV 2 (サーバ 2) にメッセージを送信し、SV 2 からのメッセージを受信する。自身が SV 2 ならば SV 1 に対し同様な送受信を行う。送信は動作速度の早い方のサーバが先に開始するが、例えば、SV 1 から SV 2 への送信が先に行われたと仮定する。このとき、LAN 上には SV 1 からの送信信号があるため、SV 2 は送信開始待ちの状

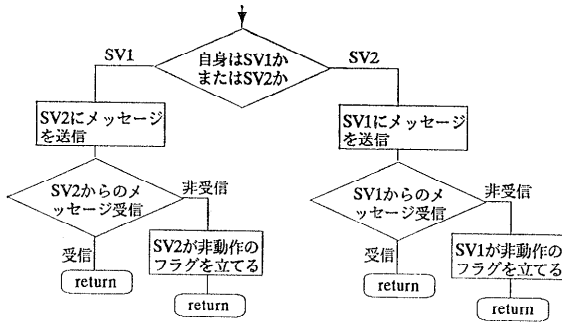


図3 2台のサーバ間の通信アルゴリズム

(SV1はレポートサーバ1, SV2はレポートサーバ2を示す)

Fig. 3 Algorithm of communication between the servers.

態にある。SV2がこのような状態にあっても、本研究で用いた基本ソフトウェアは、SV1からのメッセージを受信用メールボックスに格納する機能を有する⁶⁾。そのため、SV2はSV1からのメッセージを格納した後、SV1へ送信し、さらにその後、SV2の受信用メールボックスを調べてSV1からのメッセージを確認できる。なお、それぞれのサーバからの送信メッセージには3バイトの文字列を用いた。

両サーバからの信号がLAN上で衝突した場合は、CSMA/CD方式におけるバックオフ時間だけ待ってから再送出される。バックオフ時間は乱数により決定されるため、どちらのサーバからの送信が先に行われるかは特定できない。そこで、どちらの送信が先に行われてもサーバが相互に通信できるようにするためには、サーバ番号に依存せず、両サーバで共用できるアルゴリズムが必要になる。そのため、図3に示すアルゴリズム構成を採った。

図3において、例えばSV1からSV2にメッセージを送信後、一定時間待ってもSV1がSV2からのメッセージを受信しない場合、SV2が非動作状態とみなしてフラグを立てる。この待ち時間は2秒に設定したが、これは後述するように、端末からのレポート提出を想定した応答時間の測定で端末1台当たり1秒以内という結果が得られたので、サーバ同士の通信だけでは十分な時間であると判断したことによる。このように一方のサーバが非動作状態と判定した場合、すなわち、相手サーバの非動作フラグが立っている場合は、以後、図3のサーバ同士の通信アルゴリズムを実行しないようにする。

以上のサーバ同士の通信後、サーバは端末からのメッセージ受信の待ち状態に入る。その後、学生が図1

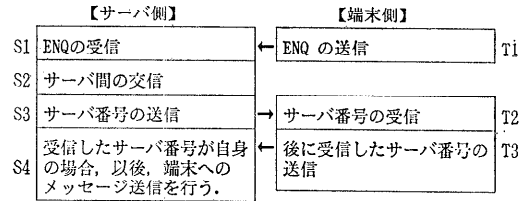


図4 サーバと端末間の同期

Fig. 4 Synchronization between a server and a terminal.

のいずれかの端末でレポート提出システム用のコマンドを入力すると、図2中の①と②の通信が行われる。ただし、図2中の①の通信を詳細に示すと、図4のようになっている。これは、サーバが受信待ち状態から①のメッセージを受信するまでの間に、1台のサーバが動作不能になっていないかを確認するためである。

図4において、サーバが端末からの同報通信でENQを受信するとS2で、図3と同じアルゴリズムにしたがってサーバ間の交信を行う。サーバが2台とも動作状態の場合は、続けてS3→T2の通信が行われるが、これは2台のサーバから行われるので、計2回になる。また、S3→T2の通信で端末が後に受信したサーバ番号をS4→T3で2台のサーバに通報する。受信したサーバ番号が自身の番号であるサーバから、以後、端末へのメッセージ送信を行う。これは端末がメッセージを受信する際、動作速度の遅い方のサーバから受信して、同期させるようにするためである。サーバには同種類のパソコンを用いたが、動作速度にわずかな差があり、早い方に同期させると遅い方が追従できなくなるための措置である。

1台のサーバが非動作の場合は、動作中のサーバがそのことを図4のS2で検知しているので、S3→T2のメッセージで端末に通知する。この場合当然ながら、端末は他の1台のサーバからのS3→T2の受信待ちにはならないようにする。また、これ以降S2のサーバ間交信も行わない。したがって、サーバが2台とも動作状態の場合より1台のみの方が、通信回数が少なく、端末から見た応答速度もわずかなではあろうが早くなるはずである。

図2において、学生が授業コードを選択すると端末には「レポートの提出」か「提出済レポートの確認」かを選択する画面が表示される。ここで前者を選択すると、レポートとして提出するファイルのファイル名、学籍番号、パスワードを入力する画面が表示される。その画面で学生がファイル名を入力すると、端末側のプログラムが前章(b)に述べたファイル内容の検

査を行う。検査条件を満たしていれば、学籍番号とパスワードが入力できるようになる。これらの入力が終わると、端末から直ちに図2中の③の通信により、学籍番号とパスワードがサーバに送信される。ただし、②の通信から③が行われるまで、端末におけるキー操作が入るため、早くても数十秒の時間がかかる。その間、サーバは待ち状態になるので、①の通信に関して前述したように、相手サーバの動作状態の確認と同期をとるためのサーバ間の通信が改めて必要になる。そのため、③の通信も詳細には、図4のようになっている。

サーバは受信した学籍番号とパスワードをRAMディスク中の対応表と照合し、その結果を図2の④で端末に送信する。照合結果が正しくなかった場合、端末はそのことを画面に表示して、動作を終了する。照合結果が正しかった場合、端末は直ちにファイル内容を、図2の⑤でサーバに送信する。サーバは⑤で学籍番号を受信しているので、学籍番号に応じたファイル名を付けて、⑥で受信したファイル内容をディスクに格納する。

ファイル受信に先立ち、図4のS2でサーバ間の通信を行って動作速度の差異を吸収し、両者の同期をとるようにしているが、端末から同報通信で送信される1つのファイル内容を受信している間は、2つのサーバは互いに独立に受信処理を行う。そのため、大きなファイルを受信する場合には、同期がずれる可能性がある。このような事態を防ぐため、図4のS4-T3で受信したサーバ番号が自身の番号であるサーバからのみACK用のメッセージを端末に返す。すなわち、その直前のT2で、端末は動作速度が遅いとみなした方のサーバとの間でシェイクハンドする。ただし、この方法では、ACKを返すべきサーバが故障した場合、他方のサーバが動作状態であってもACKは返さないで、端末はACKの到達を待ち続けることになる。そこで一定時間以上待ってもACKが受信できない場合、端末はその旨をサーバに通報する。それを受信した動作状態にあるサーバは端末にACKを返し、ファイルの後続部分の受信を再開する。

なお、図2の③の通信が行われる前に学生が入力するファイル名は、プログラムファイルのファイル名とそのプログラムが読み込むデータファイルのファイル名である。ただし、入力文を含まないプログラムの場合は、データファイル名は入力されない。データファイル名も入力された場合、サーバはプログラムファイ

ルの受信後、図3のサーバ間通信を行って互いを同期させ、続けてデータファイルを受信するようにした。

また、図2において、①と②の通信は連続して行われるが、端末画面の表示に沿ったキー操作が必要なため、サーバは②の送信を行った後、他の端末に対しても応答できるよう、メッセージ受信の待ち状態に戻る。したがって、ある端末との間で①と②の通信を行った後、③の受信をするまでの間、別の端末からの①あるいは③の受信を行う場合もある。

5. 応答時間の実験測定と運用状況

フォールトトレラント化を図ったレポート受付システムの開発後、図1の実習システムにインストールして、レポート提出操作時の応答時間を実験的に測定した。テスト要員が小人数だとファイル転送時間が短く、時間測定の誤差が大きくなる。そこで、少なくとも数秒以上の応答時間が得られるようにするため、12人の学生と職員に協力を依頼し、1人が2台ずつの端末を受け持つようにした。

12人の中の1人の号令にしたがって、全員が同じ操作を一斉に行い、レポートとして提出するファイルの転送時間を測定した。この時間は、24台の端末からのファイル1つずつに対し、図2中の③に始まり、④、⑥を経て、サーバがファイルをディスクに格納し終わるまで、すなわち、③-④-⑥を連続的に24回繰り返した時間に相当する。24台の端末から提出するファイルはすべて同じ内容のプログラムファイルとデータファイルとし、容量がそれぞれ2013バイトおよび157バイトのものを選んだ。これらは、実際に学生がレポート用に作成した80ステップのFORTRANプログラムと、そのプログラム中の入力文が読み込むデータであり、レポートとしては比較的容量の大きなものである。また、これらのファイルは24台の端末のハードディスクに格納しておき、そこから提出するようにした。12人が操作するのでキーの押下に時間差が生ずるので、5回の測定を行った。その平均値、および平均値を端末台数24で割った値、すなわち端末1台あたりに要した時間を表1に示す。表1では、次の(1)~(3)の3種の場合につき、得られた結果を示している。

(1) サーバを2台とも動作させた場合：

これは通常の運用を想定したテストで、24台の端末からの転送時間は約15秒であった。端末1台あたりは約0.63秒となる。

表 1 提出操作における応答時間の実験結果
Table 1 Experimental results of response time for report submission.

サーバ台数	応 答 時 間	
	端末24台当たり	端末1台当たり
2 台	約15秒	約0.63秒
1 台	約14秒	約0.58秒
従来 (1台)	約11秒	約0.46秒

実験条件：プログラム (2013バイト)，データ (157バイト)
24台の端末から提出操作。5回の測定の平均値

(2) サーバを1台だけ動作させた場合：

これは1台のサーバが故障した場合を想定したテストである。サーバが2台とも動作状態の場合に比べて、わずかではあるが、応答時間は短くなった。これは前章に述べたように、1台のサーバが動作不能の場合、図4中のS2のサーバ間の通信が不要であり、S3→T2の通信も1回だけで済むからである。

(3) 従来、1台のみのサーバを利用した場合：

これは、本報告のフォールトトレランスを実現する以前の、1台のサーバでレポート受付システムを構成していた場合である。この場合、サーバと端末間では図2に示す通信だけが行われ、図4の部分は存在しなかった。そのため、表1中で最も短い応答時間が得られている。

本報告のフォールトトレランスを具備したレポート提出・受付システムは1991年6月に運用を開始したが、それ以前は1台のみのサーバであった。フォールトトレランス実現後は、表1に示すように、応答時間が長くなったが、それでも学生には感覚的な時間増大に至っていないらしく、応答速度に対する質問・苦情は現在まで寄せられていない。端末108台のうち、約40台でレポート提出操作が行われている際に日視観察したが、多くの場合1秒以内で、遅い場合でも2秒以内で応答していることが確認された。ただし、ここでの40台とは、レポート提出用画面が表示されているパソコンが約40台あった、という意味である。すなわち、学生はその画面で、ファイル名、学籍番号、パスワードを入力するが、キー操作に個人差があるため、テストの場合のように40台から一斉にレポートが送出された、という意味ではない。

当システムは現在まで1年余り運用したが、その間サーバは一度も故障しなかったため、実運用におけるフォールトトレランスの有用性はまだ実証されていない。テストでは、動作中のサーバ2台のうち、1台を

停止させても、残る1台でサーバ機能が継続できることは確認した。

6. おわりに

ハードウェアの改造を伴わずにパソコンサーバのフォールトトレランスを実現する手法を考察した。通常の市販のパソコン2台をサーバに用いて、端末からは同報通信を行って、同じ情報をサーバに記録する方法を採ることにした。この手法を従来から運用してきたレポート提出・受付システムに応用し、フォールトトレラントシステムとして具体化した。2台のサーバを用いたので、動作速度の差異を吸収するためのサーバ間の通信が必要となり、応答速度は低下したが、学生が感知できるほどではなく、実運用にも供せられるシステムとして実現できた。実運用におけるフォールトトレランスの有用性はまだ実証されていないが、テストでは2台のサーバの1台を停止させても、サーバ機能が継続できることを確認した。

ここでのフォールトトレランスは、レポート受付用サーバに具体化した。たとえば掲示板サーバなど、他の目的のサーバに対しても応用できよう。また、サーバとして2台のパソコンを用いたこと以外、すべてソフトウェアで対応したため、実習用パソコンの数年ごとの新機種への更新にも容易に対応できる。

ここで開発したシステムでは、端末台数と設置場所および運用時間が限定されている教育用の特徴を活かして、簡易にフォールトトレランスを実現しようとした。たとえば、1台のサーバが故障した場合、単に故障機を運用系からはずし、その日の残りの運用は1台のみのサーバで行うという方法は、運用時間が限定されていることによる。将来、運用時間が延長された場合、代替機にファイルを復元し、サーバとして復帰させる機能が必要になろう。今後LANが延長され、より広範な場所からサーバにアクセスできるようになれば、セキュリティ対策も必要になろう。さらに、1台のサーバが一時的に通信不能になった場合の対処も、今後の課題として残されている。

謝辞 本研究の一部は文部省科学研究費補助金一般研究(C)(03680251)を受けて行われた。

参 考 文 献

- 1) Denning, P. J. et al.: Computing as a Discipline, *Comm. ACM*, Vol. 32, No. 1, pp. 9-23 (1989).
- 2) 林：情報処理教育におけるネットワークの活用，

文部省平成3年度情報処理教育研究会講演論文集 (パネル討論資料), pp. 161-162 (1991.12).

- 3) 松山, 横井: LAN を利用したレポート受付システムの開発, 日本産業技術教育学会誌, Vol. 33, No. 4, pp. 261-268 (1991).
- 4) 当麻(監), 向殿(編): コンピュータシステムの高信頼化技術入門, pp. 7-9, 日本規格協会 (1989).
- 5) 松山, 横井: 情報教育実習システムにおける効率的電子掲示板機能の実現, 第40回情報処理学会全国大会論文集, pp. 37-38 (1990. 3).
- 6) (株) 富士通: 通信タスクモニタ & DSLINK ドライバ使用手引書 (FMR シリーズ) (1987).

(平成4年4月30日受付)

(平成5年1月18日採録)



松山 実 (正会員)

昭和19年生, 昭和51年ウィンザー大学大学院博士課程修了. 武蔵工業大学情報処理センター講師を経て昭和54年同助教授. Ph. D. 主に教育用情報処理システムに関する研究・開発に従事. 著書「基礎数値解析」(昭晃堂)など. 電子情報通信学会, 日本産業技術教育学会, IEEE 各会員.



横井 利彰 (正会員)

昭和34年生, 昭和61年早稲田大学大学院博士課程修了. 武蔵工業大学情報処理センター講師を経て平成4年同助教授. 工学博士. 主に電磁界数値解析および最適設計に関する研究に従事. 電気学会, 日本シミュレーション学会, IEEE 各会員.