

実空間指向のアンビエントなインタラクションのための滑らかなネットワークに関する研究

代表研究者 山口 巧 高知工業高等専門学校電気情報工学科准教授
 共同研究者 谷澤 俊弘 高知工業高等専門学校電気情報工学科准教授

1 はじめに

無線タグなどを活用したセンサ/プロセッサ等が実空間に遍在するユビキタスコンピューティング(以下, ユビコンプ)環境下では, 近い将来, あらゆる物がネットワーク化されたとき, 自分の周りをコンピュータが包み込むような状況(サラウンディングコンピューティング)となり, それに起因する極端な情報氾濫が日常生活に発生する. そこで, 必要なときに必要な状況情報のみを獲得し, 的確なコンピュータ資源を有機的に接続しながら, 人間がストレスを感じることなく安心して自然な感覚で情報サービスを行うことを可能にする, 状況を理解した賢い支援(context-aware)型ヒューマンインタフェースシステムが求められる. しかし実現には, 途切れなく滑らかな情報ネットワークが持続的な状態でネットワークストレスなく実現されなければならない.

本研究は昨年度からの継続テーマであり, 複雑かつ大規模な情報ネットワークの課題のうち, ネットワーク構造の理論解析として, 我々はネットワーク構造が最も安定していて, 情報伝達が最も効率的なネットワークの構造を議論してきた.

本研究では, ランダムなノードの機能不全とハブに対する重点的な攻撃の双方に対して同時に頑強であるネットワーク構造は二極次数分布構造であることを解析的手法を用いて導出した. さらに, 二極次数分布構造を持つネットワークとスケール・フリー・ネットワークとの間を連続的に内挿する多極次数分布ネットワークを導入し, ノードあるいはリンクを除去した場合のパーコレーション閾値, 最大クラスターサイズ, 平均クラスターサイズ, 転移点近傍の臨界指数等の重要な諸量を計算した. その結果として, ハブを導入することによって外部擾乱に対するネットワークの頑強性はどのように変化していくのかについて数学的に厳密な知見を得ることができ, 現実に存在するさまざまなネットワークが外部擾乱に対してどのように機能不全に陥って行くか等について確かな指針が得られ, よりセキュアなネットワークを設計することができることを示した.

一方, アンビエントなコミュニケーション支援手法の幾つかとして, 日常生活行動連動型の実践的なアプリケーションインタフェースシステムを実装し, 新たな支援モデルの提案・評価を進めた. 全学的に構築された無線 LAN 環境を活用した電子黒板システムを基にして, 学習者をそれとなく教師が支援できる新しい双方向の学習支援システムの実運用を実践した. これらは, 実装システムの特徴である遠隔空間や多地点間, 接続台数や要素が頻繁に変化する柔軟なシステムとなっており, 今後理論的なスケール・フリー・ネットワークの検証に繋げられる.

本稿では, ネットワークトポロジとその安定性の理論的な要件についての議論を2章に示し, アンビエントな情報呈示とコミュニケーション支援手法についての議論を3章に示す. 最後に4章でまとめを述べる.

2 多極次数分布ネットワークの構造的性質について

スケール・フリー・ネットワークは構成ノードのランダムな機能不全に対しては非常に頑強であるが, ハブを重点的に除去された場合には極端に脆弱であるという二面性を持っている. 本研究では, ランダムなノードの機能不全とハブに対する重点的な攻撃の双方に対して同時に頑強であるネットワーク構造は二極次数分布構造であることを解析的手法を用いて導きだす. さらに, 二極次数分布構造を持つネットワークとスケール・フリー・ネットワークとの間を連続的に内挿する多極次数分布ネットワーク (multimodal network) を導入し, これも解析的手法を用いて, ノードあるいはリンクを除去した場合のパーコレーション閾値, 最大クラスターサイズ, 平均クラスターサイズ, 転移点近傍の臨界指数等の重要な諸量を計算する. この計算から, ハブを導入することによって外部擾乱に対するネットワークの頑強性はどのように変化していくのかについて数学的に厳密な知見を得ることができ, 現実に存在するさまざまなネットワークが外部擾乱に対してどのように機能不全に陥って行くか等について確かな指針が得られ, よりセキュアなネットワークを設計

することができるようになる。

2-1 問題の定式化

ネットワーク構造を特徴づける最も基本的な量は、各ノードの持つ次数（リンク数）分布である。次数分布とは、各ノードの次数を k としたとき、次数 k を持つノード数 N_k の全ノード数 N に対する比 $N_k/N \equiv P(k)$ のことであり、非常に精力的な研究が行われているスケール・フリー・ネットワークは、この次数分布がべき乗関数となっているもの $(P(k) \propto k^{-\lambda})$ である。もちろん、次数分布だけでは構造を完全に決定することはできないが、ここではネットワーク構造の持つ最も基本的な性質を抽出するために、ネットワークは与えられた次数分布に従ってランダムに生成されるものとし、同じ次数分布 $P(k)$ から生成されるネットワーク集合の統計的な性質を考察していくこととする。簡単のために、以降の考察ではこのようなノード間の次数相関については考えない。また、明らかに各ノードの平均次数 $\langle k \rangle = \sum_k kP(k)$ が大きいほど、どのようなノード除去方法についてもネットワークは頑強になることは明らかであるから、総ノード数 N に加えて、ノードの持つ次数の平均値 $\langle k \rangle$ もあらかじめ与えられているとする。総ノード数 N 、次数分布 $P(k)$ のネットワークを考える。最初、このネットワークの全てのノードは互いに連結しているとする。この状態から何らかの方法でいくつかのノードを除去していくと、これ以上のノードを除去すると残りのノードがバラバラになってしまうようなノード除去数の上限値が存在する。この限界ノード数の全ノード数に対する比 f をノード除去閾値 (threshold) と呼ぶ。ノード除去閾値を用いれば、ネットワークの構造最適化問題は、ノード除去の方法が与えられた場合に、そのノード除去方法に対して最も大きなノード除去閾値 f の値を持つ次数分布 $P(k)$ を探す問題に帰着する。ノード除去閾値 f は $0 \leq f \leq 1$ の範囲にあり、また、ノード除去をどのよう

な方法で行うかに依存する。もし、 $f \approx 1$ であれば、ネットワークの連結を破壊するためにはほとんど全てのノードを除去しなければならないわけであるから、その次数分布 $P(k)$ は大変に頑強であることになる。

反対に、 $f \approx 0$ であれば、極めて少数のノードを取り除いただけでネットワークはバラバラになってしまうわけであるから、その次数分布 $P(k)$ は非常に脆弱であるということになる。以下では現実のネットワークの機能不全にとって最も重要と思われる次の2つのタイプのノード除去について考えることとする。

(1) random failure

ネットワークを構成する各ノードは故障したり、その他の事情によってネットワークから除去される場合がある。しかも、多くの場合、ノードの故障は互いに無関係に起こる。この場合を random failure と呼ぼう。

これをモデル化するために、全ノード数のうち f_r の割合のノードがランダムに選ばれ、ネットワークから除去されるとする。初期の次数分布 $P(k)$ を与えたときに、ノード除去後のネットワークが依然として全体の連結性を保つという条件下で、除去しうるノードの割合の最大値がその次数分布 $P(k)$ の random failure に対するノード除去閾値である。この場合には、厳密な理論的考察があつて、 $P(k)$ が与えられた場合、総ノード数 N が非常に大きいネットワークのノード除去閾値 f_r は

$$f_r = 1 - \frac{1}{\langle k^2 \rangle / \langle k \rangle - 1}$$

で与えられることがわかっている。ここで $\langle \dots \rangle$ はノードが除去される前のもともとのネットワークの次数分布 $P(k)$ に関する期待値を表わす。

(2) targeted attack

次に、ネットワークの機能停止を目的として外部から意図的な攻撃が行われる場合を考え、この場合を targeted attack と呼ぼう。この場合は、ネットワーク中で多数のリンクを持つノード（ハブ）から順に K から \bar{K} まで除去されていく。次数分布の上部の f_t の割合のノードが除去されるとしよう。このハブ・ノード

の除去により、残りのノードの次数分布も変化することを考慮すれば、この場合のノード除去閾値 f_t は

$$f_t = \sum_{\bar{k}}^K P(k)$$

$$p = \frac{\sum_{\bar{k}}^K kP(k)}{\langle k \rangle}$$

$$1-p = \frac{1}{\bar{k}-1}$$

という連立方程式によって決まることがわかっている。ここで K はノード除去前の最大次数、 \bar{K} はノード除去後の最大次数であり、 $\bar{k} \equiv \langle k^2 \rangle / \langle k \rangle$ における平均 $\langle \dots \rangle$ はノード除去前の次数分布 $P(k)$ の \bar{K} までの部分に関する平均である。

(3) ネットワーク構造最適化問題の定式化

以上により、ネットワーク構造最適化問題を定式化すると以下の通りになる。

総ノード数 N と各ノードの平均次数 $\langle k \rangle$ を与えた場合に、random failure に対するノード除去閾値 f_r と targeted attack に対するノード除去閾値 f_t の和 $f_T = f_r + f_t$ が絶対的な最大値

$$\bar{f}_r + \bar{f}_t = 1 + \left(1 - \frac{1}{\langle k \rangle - 1}\right) = 2 - \frac{1}{\langle k \rangle - 1} \equiv \bar{f}_T$$

にできるだけ近くなるような次数分布 $P(k)$ を決めよ。

ここで問題となるのは、 f_r の上限値 $\bar{f}_r = 1$ はネットワーク内に多くのハブを持つスケール・フリー・ネットワークのような広がった次数分布を持つネットワーク構造に対して得られるものであり、 f_t の上限値 \bar{f}_t は全てのノードが平均次数 $\langle k \rangle$ と同じリンクを持つような完全に一樣なネットワーク (regular graph) に対して得られるものである、という点である。つまり、この二つの全く異なるネットワーク構造の頑強性を同時に併せ持つネットワーク構造を見つけることができるのか、ということである。

2-2 二極次数分布構造

二極次数分布 (bimodal distribution) (図 1 参照) のネットワークには二つの次数 k_1, k_2 を持つノードしか存在しない。小さい方の次数 k_1 は本質的には与えられた平均次数 $\langle k \rangle$ に等しい。大多数のノードがこの次数を持つ。大きい方の次数 k_2 を持つノードは全ノードのうちの r の割合を占め、ハブの役割を担う。なぜこの二極分布構造が故障に対しても攻撃に対しても頑強であるのかを定性的に述べると次のようになる。

(a) 与えられた平均次数 $\langle k \rangle$ に等しい次数を持つ単一のノード種から成るネットワークが外部からの攻撃 (targeted attack) に対して最も高い頑強性 ($f_t = \bar{f}_t = 1 - 1/(\langle k \rangle - 1)$) を持つ。

(b) 故障 (random failure) に対する頑強性を上げるためにはハブの導入は不可欠である。従って、ネットワーク内には 2 つ以上の異なる次数を持つノードがなければならない。

(c) しかし、攻撃 (targeted attack) に対する頑強性を損なってしまうほどの多種類のハブは導入できない。従って、導入し得るハブはもともと存在するノード種 (次数 $\langle k \rangle$) 以外にただ 1 種類のみである。

(d) その結果、2 種のノード群を含むネットワーク (bimodal network) が故障に対しても攻撃に対しても最大の頑強性を持つ

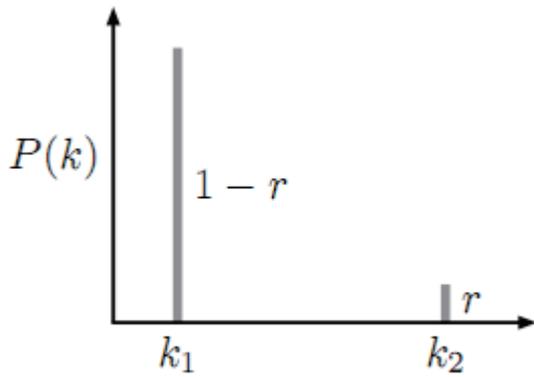


図1 二極次数分布 (bimodal distribution)

2-3 多極次数分布構造

二極次数分布ネットワークとスケール・フリー・ネットワークとの関係を見てみよう。故障にも攻撃に

も強い二極次数分布ネットワークは $r \propto k_2^{-3/2}$ であるから、指数 $1+3/2=2.5$ のスケール・フリー・ネットワークと見することもできる。* 二極次数分布ネットワークの特徴は $f_r \approx 1$ であると同時に、 f_t の値も $1-1/(\langle k \rangle - 1)$ に近い値を取り得るということであった。これに対してスケール・フリー・ネットワークは

$f_r \approx 1$ ではあるが、ハブの種類があまりに多いために $f_t \approx 0$ となってしまう。ハブの種類がどの程度まで多くなると targeted attack に対する頑強性が失われてしまうのかを調べるために、 m 種類のノード種を持つ多極次数分布ネットワーク (multimodal network) を考えてみる。(図2参照) このネットワークは一番大きな次数 k_m とそのノード種の割合 r_m の他に、1 より大きな値をとる a , 0 と 1 の間の値をとる b の合計4つのパラメータを持つ。また、 m 種のノード種の持つ次数 k_i ($i = 1, 2, \dots, m$) は $k_i = k_m b^{m-i}$

であるとし、次数 k_i を持つノード種の割合 r_i は $r_m a^{m-i}$ であるとする。この多極次数分布ネットワークは指

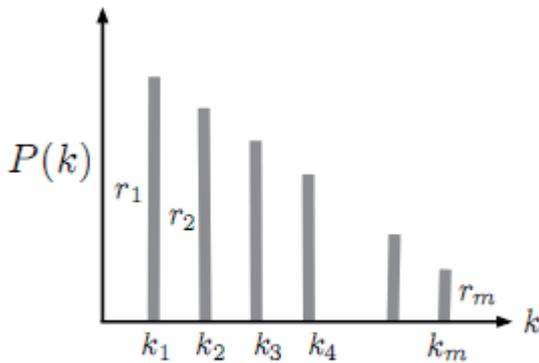


図2 多極次数分布 (multimodal distribution)。モード数 m を無限大にする極限でスケール・フリー・ネットワークの次数分布となる。

数 $1 - \ln a / \ln b$ のべき乗次数分布を持つネットワークと見なすことができ、モード数 $m \rightarrow \infty$ の極限でスケール・フリー・ネットワークに帰着する。従って、このネットワークを調べることで、二極次数分布ネットワークとスケール・フリー・ネットワークの間の移り変わりを調べることができる。この多極次数分布ネットワークも、二極次数分布ネットワーク同様、 f_r および f_t を厳密に求めることができる。我々は、総ノード数 N , 平均次数 $\langle k \rangle$, モード数 m を与えた上で、最大の $f_T \equiv f_r + f_t$ を与える最大次数 k_m と r_m を数値計

算によって求めた。その結果、以下のことがわかった。

2-4 まとめ

ネットワークの頑強性はどのように変化していくのかについてのまとめは以下のようになる。

- ネットワークを構成する個々のノードの相互に無相関な機能不全 (random failure) と外部からのノードの選択的な除去 (targeted attack) に対して最も頑強であるネットワーク構造は二極次数分布構造である。
- 総ノード数 N , 平均次数 $\langle k \rangle$ を与えたとき、最も頑強な二極分布ネットワーク構造は、ネットワ

ーク内に次数 $\sqrt{\langle k \rangle N}$ のハブ・ノードが個数 $(A^2 / \langle k \rangle)^{3/4} N^{1/4}$ だけ含まれているものである。残りのノードはすべて決められた平均次数 $\langle k \rangle$ に等しい次数を持つ。なお、定数 A は

$$k_2 \sim \left\{ \frac{2\langle k \rangle^2 (\langle k \rangle - 1)^2}{2\langle k \rangle - 1} \right\}^{1/3} r^{-2/3} \equiv A r^{-2/3}$$

で定義されている。二極次数分布 (bimodal distribution) の二つの次数 k_1, k_2 のうち大きい方の次数 k_2 による。

- ネットワーク内に含まれる次数の異なるノードの種類を m とすると、だいたい m が $1 + (0.62 \langle k \rangle - 1.0) \log_{10} N$ より大きくなると、外部からのハブに対する選択的な攻撃に対する頑強性が失われる。

3 アンビエントな情報呈示とコミュニケーション支援手法

アンビエントなコミュニケーション支援手法の1つとして、対面/遠隔型両方に活用でき、ユビキタスラーニングが実現できる双方向型授業支援システムを実装し、新たな支援モデルの提案・評価を進めた。これらの実装システムの特徴である遠隔空間間や多地点間、接続台数や要素が頻繁に変化する柔軟なシステムとなっており、今後理論的なスケール・フリー・ネットワークの検証に繋げられる。

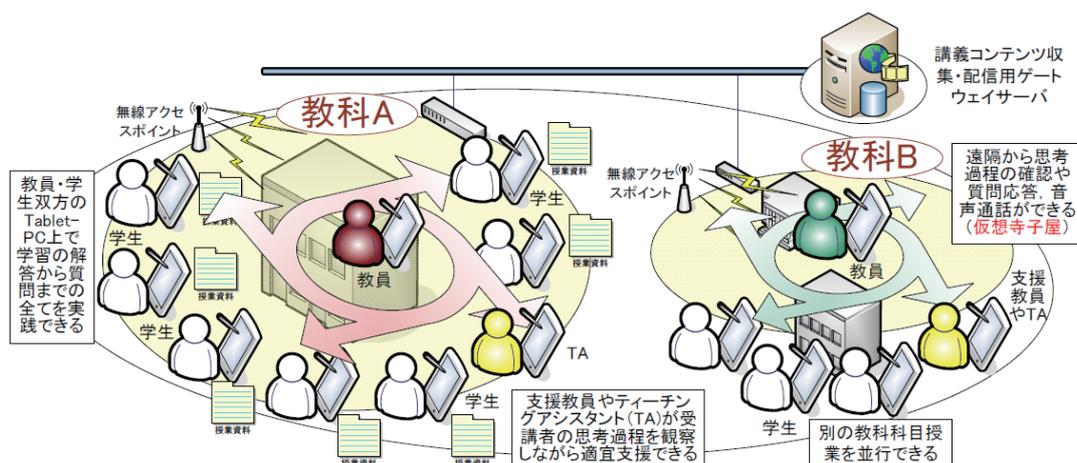


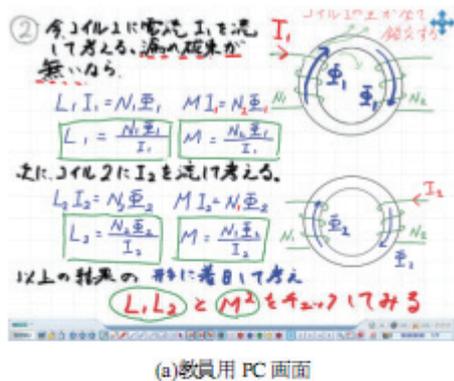
図3 ユビキタスラーニングが実現できる双方向型授業支援システム

3-1 双方向型授業支援システム

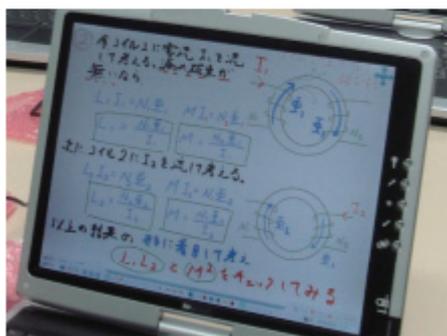
本システムは、図3に示すように教員用PCと学生用PCが無線LAN環境下で相互に接続されており、授業教材の配信・収集にはバックボーンに接続されたサーバ群を用いている。本校のように全学的な無線LAN環境下であれば、将来的には学生と教員の所在に依存せずに授業を行える可能性もあり、サテライト教室や遠隔授業も可能なシステムとなっている。今回は、通常講義形式の授業に本システムを適用するために、1クラス40名で利用できるシステムを教室に構築した。教員用PC、学生用PCにはWindows XP Tablet PC EditionをOSとするCentrino-1GHzのコンバーチブルタイプのタブレットPCを41台、サーバにはWindows Server 2003をOSとするPentium4-3GHz、1GBメモリを配した。また、PC40台分の電源コンセントが常備されていない教室での授業も可能なように、タブレットPCはバッテリー駆動で連続4時間以上を確保できるものを選定した。なお、本校のLAN環境は、IEEE802.11b無線LANならびに100Base-TX/1000Base-T有線LANである。この環境下で該当教室内に無線LANのアクセスポイント(AP)を3台設置した。バックボーンとなるネットワークとサーバの性能は、教員用オーサリングソフトウェア及び学生用クライアントソフトウェアの同時接続数41以上で、1人あたり500kbpsを確保できるイントラネット環境を維持するように設定を行っている。

(1) ソフトウェア

ソフトウェアに関しては既存の電子黒板システムを基盤にし、既存システムが持つオンデマンド機能を縮小して、教員と学生が対等に双方向通信できるインタラクティブ性を重視した独自仕様のものを実装した。通常授業において、本校に在学している15~20歳の多感な年齢の学生にとっては、課題演習時などに質問があっても挙手による質問には、目立つことへの気恥ずかしさやこんな質問してよいのかという遠慮、あるいは質問内容を他学生に知られる恥ずかしさがある。よって挙手による意思表示はないが、課題を解く過程で行き詰っている学生も多いる。このような状況を鑑み、本システムではPC画面上でボタンを押すだけで気軽に質問ができ、質問内容を他の学生に知られることなく教員の丁寧な指導が受けられるような支援機能に重きをおいている。ソフトウェアはサーバ用ソフトウェア、教員用PCのオーサリングソフトウェア、学生用PCのクライアントソフトウェアの3つで構成している。



(a) 教員用 PC 画面



(b) 学生用 PC 画面

図 4 コラボレーションモード時の PC 画面

はコラボレーションモードとフリーモードの 2 つに大別される。

[コラボレーションモード]

教員用 PC 画面を 40 台の学生用 PC 画面に反映させることができ、電子黒板の役割を果たす(電子黒板機能)。コラボレーションモード時の教員用 PC 画面と学生用 PC 画面を図 4 に示す。平常授業で教員が黒板に書いている内容を教員用 PC 画面上に書くだけで全学生用 PC 画面に反映され、学生は目の前の PC 画面を見ていれば授業の内容を理解できるようになっている。さらに、その状態で特定の学生用 PC にのみ書き込み権限を与えることも可能となっており、1 人の学生が課題を解く過程を全員の PC 画面で見ることが可能である(指名学生によるプレゼンテーション機能)。また、試行授業の結果よりメモ機能の追加を行った。これは、教員の説明画面を見ながら要点をメモするための別ウィンドウを開くことができる機能である。

[フリーモード]

教員用 PC から送った課題などの画面に学生が自由に書き込むことができ、書き込んだ結果は各学生用 PC の個々の画面にしか反映されない。ただし、教員用 PC 画面では、全学生用 PC 画面を閲覧できるようになっていて、閲覧の際に課題を解けずにいる学生がいれば、その学生用 PC とのみ教員用 PC の画面を共有し、ヒントを送ることができる(個別指導機能)。また、試行授業の結果より質問要請機能の追加を行った。これは、学生より質問がある場合に学生用 PC 画面上の質問要請ボタンを押すことによって教員用 PC との画面の共有を要請し、質問に答えてもらうことができる機能である。さらに、コラボレーションモード時に作成された黒板の板書やフリーモード時に各学生が課題を解いた結果の画面は、各学生用の PC や外部メモリに保存することによってノートの代わりとすることができ、一旦保存した課題などは教員用 PC に提出することも容易にできるようになっている。

3-2 パイロット授業の評価

パイロット授業開始 1 ヶ月後(平成 18 年 9 月)と年度終了時(平成 19 年 2 月)の学生の意識変化を明らかにするために、再度アンケート調査を実施した。このアンケート調査は、平成 18 年度 9 月に行ったものと同じ質問項目での 5 段階カテゴリ調査である。授業評価の質問項目を以下に示す。

□ 質問 1 先生の話し方は明瞭で聞きやすい

[サーバ用ソフトウェア]

主要な機能は、教員用 PC と学生用 PC の接続状況の管理、学生用 PC からの提出ファイルの保存と教員用 PC からの閲覧環境提供、などである。

[教員用オーサリングソフトウェア]

オーサリングソフトウェアでの主な機能は、以下の通りとなっている。

- ①資料の配付
- ②学生用 PC 画面の閲覧
- ③コラボレーションモードとフリーモードの切り換え
- ④コラボレーションモードにおける学生用 PC の書き込み権限許可
- ⑤フリーモードにおける特定の学生用 PC との共有画面選択
- ⑥資料提出の設定

[学生用 PC のクライアントソフトウェア]

学生用 PC の環境設定は、教員用 PC からの遠隔操作によって行われるため、学生用 PC のクライアントソフトウェアの機能は多くはなく、講義ノートの保存と閲覧、画面の取り込み、資料提出などであった。しかしながら、試行授業の結果などよりメモ機能と質問要請機能を追加した。

(2) 支援モード

サーバ用ソフトウェアを仲介しながら、教員用 PC のオーサリングソフトウェアと学生用 PC のクライアントソフトウェアが連動して教員用 PC と学生用 PC 間の授業支援を実現している。授業支援のモードとして、教員用 PC と学生用 PC との状態

- 質問 2 授業の進め方は適切であった
- 質問 3 黒板の文字は見やすかった
- 質問 4 質問に対して丁寧に説明指導してくれた
- 質問 5 授業に集中させる雰囲気作りが出来ていた
- 質問 6 問題集やプリントは十分参考になった
- 質問 7 内容はあなたにとって適切であった
- 質問 8 試験は講義との関連性があった
- 質問 9 成績の評価は妥当であった
- 質問 10 総合的に満足のいく授業だった

各質問の評価平均値を比較した結果を図5および表1に示す。図5の各質問を比較すると、質問10を除いて、パイロット授業年度終了時の方が高い評価となっている。調査時期による差異を明らかにするために、全回答をF検定により分散検定し、その結果に応じて等分散/非等分散を仮定したt検定を使い分けて有意差検定を行った。質問項目ごとに両側棄却10%のt検定を行った結果、データに有意差が見られたのは、質問7: 短時間の練習で使えるようになった、質問8: 速度の面を改善する必要がない、質問9: 使い勝手の面を改善する必要がない、の3項目であった。質問7に関しては、パイロット授業開始当初は評価平均点3.6であったものが、週1回の授業で半年間使うだけで、4.5に増加した。システム操作に慣れたことで、操作は意外に簡単であると評価しなおしたことになる。質問8に関しては、評価平均点2.0から3.5に変化しており、10の質問項目の中では最も差が大きくなっている。速度面に関しては本システム導入当初から

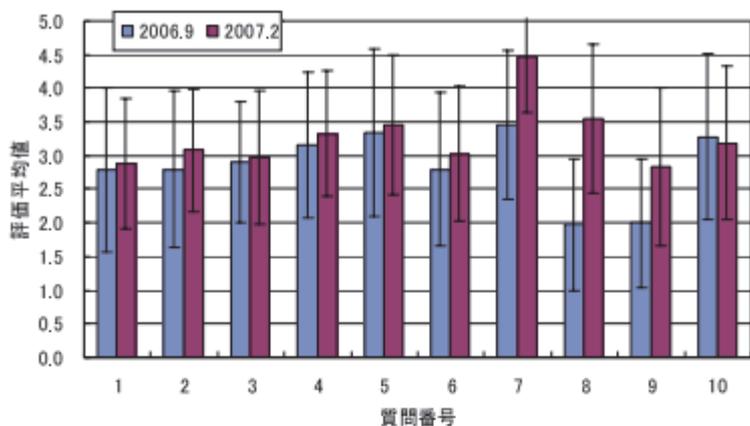


図5 パイロット授業導入前後の授業評価

表1 授業評価結果

質問	評価平均値	標準偏差
1	2.9	0.97
2	3.1	0.91
3	3.0	1.0
4	3.3	0.93
5	3.5	1.0
6	3.0	1.0
7	4.5	0.83
8	3.5	1.1
9	2.8	1.2
10	3.2	1.1

不満の声があったが、可能な範囲のソフトウェアとハードウェアの改善を行ったことによって、大量の配付資料を送付するなどの特定の操作を行わなければ実用上問題のない応答速度が維持できるようになっている。質問9に関しては、使い勝手の向上を目的としてクライアントソフトウェアに機能追加を行った成果であると考えられる。大きな改善としては、コラボレーションモード時の「メモ書き機能」の追加やフリーモード時の学生用PCから教員用PCへの「質問要請機能」の追加がある。これらにより、学生は講義メモを残せること、疑問点が生じたら即座に質問要請できること、から授業に対する意欲を維持することが可能となった。メモ書き機能は、コラボレーションモード時の授業に合わせて必要事項を記入するものであり、基本的にはフリーモードの演習時以外の全ての時間で利用するため、授業の最初にメモ書き画面を開いて、授業が終わった時に閉じることになる。図6に学生用PCから質問要請があったときの教員用PC画面を示す。図6は、ある学生からの質問要請に対して一対一で接続し、ヒントを与えている画面である。質問要請があった場合に図中右下の枠で囲んだ部分が開かれ、このリストにある学生用PC名をダブルクリックすることによって教員用PCと一対一で接続できる。質問要請の利用回数は、授業

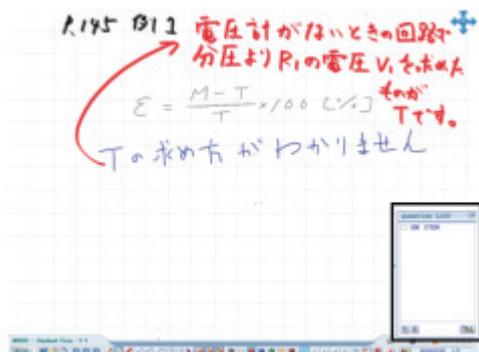


図6 教員用PCの質問要請受付画面

の内容に大きく左右されるが、一例を示すと、1 講義時間である 50 分の間、演習を中心とした授業時における質問要請の回数は 21 回であり、質問要請を行ったのべ人数は 17 人で、トータルでの質問時間は 14 分 13 秒であった。1 人あたりの平均質問時間は 50 秒で、一番長い人で 3 分 20 秒、一番質問回数の多かった人は 3 回であった。追加したこれらの機能は教員対学生という一對多の双方向授業を成立させるための必要要素であると考えられる。まだ改善すべき点もあるが、使用に大きな不便を感じさせない程度までの改善ができていていると判断している。

図 5 の結果より平成 19 年 2 月の評価平均値に着目すれば、中には 3.0 を僅かに切っている評価平均値の項目もあるものの、ほぼ全質問項目で 3.0 付近の評価が得られており、本システムは授業支援ツールとして活用可能なシステムであることが確認

できた。また特に、質問 4：質問の解答を書くことに集中できる、質問 5：先生との直接のやり取りができるので、間違いなどをすぐに訂正してもらえるとところが良い、で 3.5 付近の比較的高い評価を得ており、本システムの目標である双方向授業によって積極的に授業参加できる学生の育成ができる可能性があることが確認できた。

3-3 まとめ

体験的課題追求型の学習やグループ学習、コラボレーションを目指した教育システムの構築が進められる昨今の教育現場において、高等専門学校という 10 代半ばの若年学生への理工系教育のために、タブレット PC を用いた無線 LAN 環境下の双方向型授業支援システムを構築した。このインタラクティブ性を積極的に活用し、「学生同士で教えあい、切磋琢磨する」学習環境・サービスの拡充が必要である。つまり、多様な学習意欲や学力を持つ学生に対応できる、学内外のどこからでも学生の「学びたい (知りたい)」気持ちにタイミング良く動機付けを行うフレームワークが求められる。ペーパーレス化によるグリーン IT と「いつでもどこでも誰とでも」ユビキタスラーニングが拡張現実感的に実現され、本システムの特性から、地域高等教育機関間連携に拡充させることができ、地域に開かれた連携型学習コミュニティ形成による ICT 連携基盤の構築を進展させることができる。このシステムは静止画ベースであるが、送受信するコンテンツのリアルタイム性が要求されるためネットワーク要件が非常にタイトであり、より複雑なネットワークトポロジとその実運用下におけるネットワーク安定性の検証に有益な実証システムにすることが可能となる。

3-4 インタフェース部のプロトタイプ

カメラを使ってユーザの頭部の撮影を行い、顔検出を利用してユーザ頭部の動作を検出する。顔検出は既に一部の携帯電話や小型ゲーム機などにも実装できる程に高速なものもあり、リアルタイムでの検出に適していると考えられる。利用した顔検出は、Haar-like 特徴による顔検出である。そして拡大の設定をユーザ動作と連動させて変更することで、設定の変更を自動化する。これにより、ユーザは画面拡大の支援を受けつつも様々な設定操作から開放され、本来の作業に集中できる可能性がある。図 7 のようにマウスポインタを中心に拡大し、マウスポインタの動きに自動追従するルーペがあるような感覚となる。そして、そのルー

ペ越しにクリックなどのマウス操作を行える。マウス操作を行うユーザの一番の注視対象であるマウスポインタ周囲に拡大後の表示を重ねることで、拡大前の部分と拡大表示との間での視線移動が起こらないようになっている。検出速度は 10~15fps 程度であり、動作の検出には十分である。一方、表示速度は 9fps 前後となっている。ユーザが拡大支援を利用するときは、動画のような瞬く間に更新されるコンテンツを閲覧するよりも文章を読んだり他の作業をしていたりことのほうが多いことや、マウスを操作するとき数 100ms 程度以上のオーダーでポインタの移動などを行うことを想定すれば、現状でも十分なシステムパフォーマンスを有している。

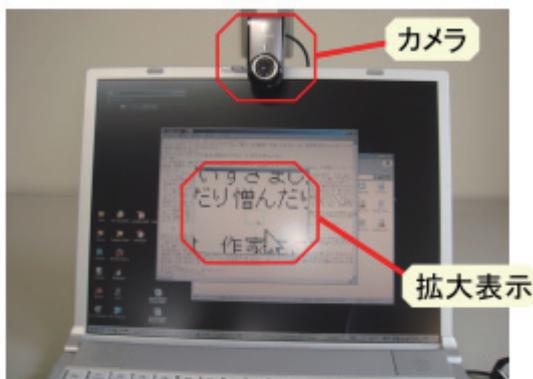


図 7 ノート型パソコンでシステムを実行している時の外観

4 結言

本研究は昨年度からの継続テーマであり、複雑かつ大規模な情報ネットワークの課題のうち、自分の周りをコンピュータが包み込むような状況であるサラウンディングコンピューティング環境下で、「ユーザ状況と情報の種類（形態）に適合する情報伝送・呈示・操作技術」という方向性での研究を目指した。状況適応サービスのためのフレームワーク構築の側面から問題の抽出を行い、様々な形態のネットワークトポロジに着目し理論的な検証を行いつつ、ユーザが状況依存型サービスを自律してシームレスに享受できるシステムについての検討を進めた。

(1) ネットワーク構造の理論解析として

我々はネットワーク構造が最も安定していて、情報伝達が最も効率的なネットワークの構造を議論してきた。実世界に存在する様々なネットワークでは、刻一刻変化する外的環境の影響を受けて、構成ノードが機能不全に陥り、さらに、それらの個々のノードの機能不全が全体に波及し、ネットワークシステム全体が機能しなくなることもある。本研究では、ランダムなノードの機能不全とハブに対する重点的な攻撃の双方に対して同時に頑強であるネットワーク構造は二極次数分布構造であることを解析的手法を用いて導出した。さらに、二極次数分布構造を持つネットワークとスケール・フリー・ネットワークとの間を連続的に内挿する多極次数分布ネットワーク (multimodal network) を導入し、これも解析的手法を用いて、ノードあるいはリンクを除去した場合のパーコレーション閾値、最大クラスターサイズ、平均クラスターサイズ、転移点近傍の臨界指数等の重要な諸量を計算した。その結果として、ハブを導入することによって外部擾乱に対するネットワークの頑強性はどのように変化していくのかについて数学的に厳密な知見を得ることができ、現実存在するさまざまなネットワークが外部擾乱に対してどのように機能不全に陥って行くか等について確かな指針が得られ、よりセキュアなネットワークを設計することができることを示した。

(2) 適応型ネットワークサービスとして

アンビエントなコミュニケーション支援手法の幾つかとして、日常生活行動連動型の実践的なアプリケーションインタフェースシステムを実装し、新たな支援モデルの提案・評価を進めた。これらの実装システムの特徴である遠隔空間間や多地点間、接続台数や要素が頻繁に変化する柔軟なシステムとなっており、理論的なスケール・フリー・ネットワークの検証に繋げられる。

- ユーザの動きに感応して支援モードを変化させるインタフェースシステム
- 遠隔の空間同士をあたかも隣接しているかのように知覚させるための通信者位置検出を行い、適応させる空間間接続システム
- 対面／遠隔型両方に活用でき、ユビキタスラーニングが実現できる双方向型授業支援システム

今後は「いつでもどこでも誰とでも」サラウンディングコンピューティングや拡張現実感（オーグメンテッドリアリティ）が融合され、地域高等教育機関間連携に拡充させることから地域に開かれた連携型学習コミュニティ形成による ICT 連携基盤の構築を進展させる予定である。現在のシステムは静止画ベースであるが、送受信するコンテンツデータのハードリアルタイム性が要求されるため、接続ネットワークの要件が厳しく、より複雑なネットワークトポロジやその実運用下におけるネットワーク安定性の検証に有益な実証システムに寄与することができると考えている。

【参考文献】

- [1] Albert-László Barabási, “Linked”, Perseus Publishing(2002). [アルバート＝ラズロ・バラバシ, 「新ネットワーク思考～世界の仕組みを読み解く～」, NHK 出版, 2002 年]
- [2] G. Paul, T. Tanizawa, S. Havlin, and H. E. Stanley, “Optimization of Robustness of Complex Networks,” *Eur. Phys. J. B* 38, 187 (2004), and its Erratum.
- [3] T. Tanizawa, G. Paul, R. Cohen, S. Havlin, and H. E. Stanley, “Optimization of Network Robustness to Waves of Targeted and Random Attacks,” *Phys. Rev. E* 71, 047101(2005).
- [4] T. Tanizawa, G. Paul, S. Havlin, and H. E. Stanley, “Optimization of the robustness of multimodal networks,” *Phys. Rev. E* 74, 016125 (2006).
- [5] 谷澤俊弘, 「故障と攻撃の両方に強いつながり方とは?」, 情報処理学会学会誌, 第 49 巻第3号, 2008 年 3 月.

- [6] R. Cohen, K. Erez, D. ben-Avraham, and S. Havlin, “Resilience of the Internet to Random Breakdowns”, *Phys. Rev. Lett.* 85, 4626 (2000).
- [7] D. S. Callaway, M. E. J. Newman, S. H. Strogatz, and D.J. Watts, “Network Robustness and Fragility: Percolation on Random Graphs”, *Phys. Rev. Lett.* 85, 5468 (2000).
- [8] R. Cohen, K. Erez, D. ben-Avraham, and S. Havlin, “Breakdown of the Internet under Intentional Attack”, *Phys. Rev. Lett.* 86, 3682 (2001).
- [9] R. Cohen, K. Erez, D. ben-Avraham, and S. Havlin, in *Handbook of Graphs and Networks*, edited by S. Bornholdt and H. G. Schuster (Wiley-VCH, New York, 2002), Chap.4.
- [10] F. Chung and L. Lu, “Connected components in random graphs with given expected degree sequences”, *Ann. Comb.* 6, 125 (2002).
- [11] Z. Burda and A. Krzywicki, “Uncorrelated random networks”, *Phys. Rev. E* 67, 046118 (2003).
- [12] M. Boguñá, R. Pastor-Satorras, and A. Vespignani, “Cut-offs and finite size effects in scale-free networks”, *Eur. Phys. J. B* 38, 205 (2004).
- [13] M. Catanzaro, M. Boguñá, and R. Pastor-Satorras, “Generation of uncorrelated random scale-free networks”, *Phys. Rev. E* 71, 027103 (2005).
- [14] M. E. J. Newman, in *Handbook of Graphs and Networks*, edited by S. Bornholdt and H. G. Schuster (Wiley-VCH, New York, 2002), pp. 35–68.
- [15] 三浦元喜, 國藤進, 志築文太郎, 田中二郎: デジタルペンとPDAを利用した実世界指向インタラクティブ授業支援システム, *情報処理学会論文誌*, Vol.2005, No.9, pp.1–11 (2005).
- [16] Jane C. Prey, Dave Berque, Robert H. Reed: *The Impact of Tablet PCs and Pen-based Technology on Education: Vignettes, Evaluations, and Future Directions*, Purdue University Press (2006)
- [17] 松内尚久, 藤原憲一郎, 芝治也, 山口巧: 遍在学習環境デザインのための双方向型授業支援システムの開発, *電子情報通信学会 2006 年総合大会*, D-15-13, p.165 (2006).
- [18] J. Roschelle: Unlocking the learning value of wireless mobile devices, *Journal of Computer Assisted Learning*, Vol.19, pp.260–272 (2003).
- [19] M. Curtis, K. Luchini, W. Bobrowsky, C. Quintana, and E. Soloway: Handheld use in K-12: a descriptive account, In *Proc. of IEEE International Workshop on Wireless and Mobile Technologies (WMTE’02)*, pp.23–30 (2002).
- [20] MedicQuest <http://www.mqsys.jp/>
- [21] X. Ren, F. Fukutoku: Usability of the stylus pen for various age groups, In *Proc. of Asian Pacific Conference on Computer Human Interaction (APCHI) 2006*, CD-ROM (Hand-held devices, pen-based input, and their applications) (2006)
- [22] 伊藤清美, 柳沢昌義, 赤堀侃司: Web 教材へ書き込みを可能とする WebMemo システムの開発と評価, *日本教育工学会論文誌*, 29(4), pp.491–500 (2005)
- [23] 勇秀憲, 芝治也, 山口巧, 前田公夫, 島内功光, 竹島敬志, 赤松重則: 多変量解析による授業評価アンケート分析, *高専教育*, 29, pp.499–504 (2006)
- [24] Pen Community, <http://pen-community.org/>
- [25] 重信智宏, 野田敬寛, 吉野孝, 宗森純: SEGODON-PDA: 無線 LAN と PDA を用いた柔軟な授業支援システム, *情報処理学会論文誌*, Vol. 45, No. 1, pp.255–266 (2004)
- [26] 田村弘昭, 岩山尚美, 田中 宏, 秋山勝彦, 石垣一司: タブレット PC を活用した手書き電子教材の実践検証, *インタラクシオン 2004*, pp.31–32 (2004)
- [27] 栗原一貴, 五十嵐健夫, 伊東乾: 編集と発表を電子ペンで統一的行うプレゼンテーションツールとその教育現場への応用, *コンピュータソフトウェア*, Vol.23, No.4, pp.14–25 (2006)
- [28] 坂東宏和, 杉崎知子, 加藤直樹, 澤田伸一, 中川正樹: 一斉授業の情報化のための電子黒板ミドルウェアの基本構成と試作, *情報処理学会論文誌*, Vol.43, No.3, pp.804–814 (2002)
- [29] 谷田貝雅典, 坂井滋和: 視線一致型及び従来型テレビ会議システムを利用した遠隔授業と対面授業の教育効果測定, *日本教育工学会論文誌*, 30(2), pp.69–78 (2006)

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
自発能動的な学習環境を提供する双方向型授業支援システムの実践と評価	情報処理学会論文誌 Vol.49, No.10, pp.3439-3449	2008年10月
Structural properties of multimodal networks	JWEIN08 日本ソフトウェア科学会 Special Interest Group on Emergent Intelligence on Network	2008年8月
多極次数分布を持つ複雑ネットワークの解析的性質について	日本物理学会講演概要集 Vol.63(2-2), pp.224	2008年9月
ユーザ動作に連動して画面拡大を行う操作支援インタフェース	Human Interface Symposium 2008, No.2313, pp.703-706	2008年9月
自動化された動作の拡大支援インタフェースの提案	電子情報通信学会 2009年総合大会, D-12-128, pp.237	2009年3月