

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准教授
共同研究者 谷澤 俊弘 高知工業高等専門学校准教授

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。

本研究では、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、オブジェクト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の可用性についての検討を目的とする。

(1) 理論的アプローチとして

インターネットの各ノードと他のノードとのリンク数分布がべき乗分布を示すことは、1999年に初めて発見された。任意のノード間の連結性はリンク数のべき乗分布が原因であることがわかっている。また、このべき乗のリンク数分布により任意のノード間のホップ数は、ノードの総数 N を用いて $\log N$ の非常に小さな数のオーダーとなることが計算され、これによって、インターネットの任意の各ノード間が非常に少数のルータによって結びつけられていることが初めて理解されるようになった。ネットワークの統計物理学的研究は、べき乗分布の起源、ネットワークにおける相転移、最小経路問題、ネットワークのノード除去における安定性など多岐に渡っているが、実際のソフトウェア開発にこれらの研究手法および研究結果を応用した例はまだない。この点が、当該研究の独創性・特色に関する位置づけである。つまり、ソフトウェア工学の立場から見れば、理論物理学をもちいた解析という新しい解析手段を手にすることになり、また理論物理学の立場から見れば、理論物理学の手法の有効性を検証する新しいフィールドを獲得できるということになる。その結果、これらが融合した新しい研究分野が生まれることも期待できる。特に、本研究は、ユーザが object-aware 情報を選択するために有効なシステムの構築と理論解析を目指すものであり、構造的に最も安定かつ情報伝達に関して最も効率的なネットワーク構造を決定し、そのネットワーク上における大量な情報のスムーズな流れを確保するためには、本研究計画にあるように、ソフトウェア工学と理論物理学という従来はあまりオーバーラップのなかった分野の融合が本質的に重要となる。

(2) アプリケーションとして

アドホックなネットワークにおいてはブロードキャスト手法の課題がある。多数の端末を中継して情報を効率よく配信するためのマルチホップブロードキャスト、フラッディング方式を検討することは重要である。不特定多数の情報アプライアンスへの情報配信とシームレスな認識を安定して行うためには、隣接台数が非常に多く、ノード数やノード配置を適応的に制御しなければならない場合、自律分散的に相互調整できるストリーミングの手法そのものも、その場その場で必要となる地域情報の配信、及びセンサネットワークにおける情報収集経路の決定に必要であり、その重要性は非常に高い。

また実際のアプリケーションとして考えると、ユーザ指向のユビコンプとしてユーザの日常活動を包括的に捉え、ネットワーク上のサーバ群をユーザ行動に感応して切り替えることにより、配信するデータサービスは自由に切り替えられる。例えば、ユーザ行動の常に傍に居るシステムからさりげない問いかけと情報

を与えることによって、ユーザに連想させ相談したくなるような実映像を主にしたアンビエントな気づきにつながるインタラクションが期待できる。

本稿では、理論物理学による理論的なアプローチから得たネットワークの機能不全と構造最適化についての議論を2章に示し、また、複雑かつ大規模な情報ネットワークの課題のうち、ライブカメラ画像などによる離れた空間間コミュニケーションをより自然にするとともに同一空間のように振舞わせるアウェアネスでアンビエントな呈示手法や情報伝送手法の検討について3章で幾つかを示す。最後に4章でまとめを述べる。

2 故障と攻撃の両方に強いつながり方とは？- ネットワークの機能不全と構造最適化-

スケール・フリー・ネットワークはその構成要素についての個々の不慮の故障に対しては非常に頑強であり、その連結性を保持できる一方、ネットワーク内の重点箇所に集中した攻撃には極めて弱く、わずか数%の重要箇所を取り除いただけで、全体がバラバラになってしまう。実は、インターネットもスケール・フリー・ネットワークであり、同様の脆弱性を持っている。では、構成要素個々の故障と重点箇所への集中攻撃の両方に対して強いネットワークを作り上げることはできるのだろうか。本章では、統計物理学の手法を用いた理論解析から明らかになった、故障と攻撃の両方に強いネットワーク設計の指針について概説する。

2-1 ネットワークの構造最適化とは？

2003年8月14日の蒸し暑い昼過ぎに起こった、アメリカ北東部大停電は、オハイオ州の一つの発電所の事故による電力供給停止がネットワーク全体に波及し、電力供給網全体がダウンしたことによるものであった。この事件は、たった一ヶ所の機能不全がシステム全体をダウンさせてしまうことがあり得ることを如実に示している。電力供給網のような、我々の生活の基盤を支えるインフラストラクチャーは簡単にダウンすることは許されない。ネットワークをうまく作ることによって、できるだけこのような全体的なシステムダウンが起こらないようにできないであろうか。

本章で考えていく「ネットワーク」とは、点（ノード）と線（リンク）に抽象化されるシステム全体である。コンピュータ・ネットワークの場合には、ノードは各コンピュータであり、リンクはそれらのコンピュータを接続する有線ケーブルあるいは無線通信による接続である。人間関係のネットワークであれば、ノードは各個人であり、リンクはその個人間の友人関係、協力関係などである。その他の場合においても、適宜、システム内の個々の要素をノード、その要素間の何らかの関係をリンクと考えていただければよい。

いずれの場合においてもネットワークは各ノードが連結され共同して動作することによってシステム全体としての機能を発揮する。したがって、ネットワークにおいては構成要素であるノードの相互連結が保たれていることが何よりも重要である。しかし、現実のネットワークは日々変化する環境の中に置かれており、初めは全てのノードが連結されていたとしても、環境変化の中でその連結性が危機に晒されることも少なくない。例えば、コンピュータ・ネットワークにおいては、接続されているコンピュータが突然故障して通信を受けつけなくなることもあるだろうし、また、機種交換などにより、ネットワークから突然切り離されてしまうこともあるだろう。特に、インターネットに代表される大規模なネットワークでは、そのようなノードの故障あるいは切り離しは相互に無関係に行われるのが普通であり、その度毎にネットワーク全体の連結性が危機に晒されるのでは、そのネットワークは実際上使い物にならない。

また、コンピュータ・ウイルスやクラッキングなどによるインターネット上の重要サイトへの攻撃が近年急増していることからわかる通り、重要なネットワークに対しては、その機能を停止させようとして外部から意図的な攻撃が行われることもある。（図1参照。）この場合、ターゲットとなるのはネットワーク内において多くのリンクを集めているノード（ハブと呼ばれる）であることが多い。いったん、外部からの攻撃

によりハブが機能を停止すれば、ハブにつながる多くのノードが影響を受ける。ネットワークの構造次第ではその影響は徐々に周りのノードへと指数関数的に広がり、ほんの少数のハブの機能停止により、ネットワーク全体を機能停止に追い込むことも可能になる。

それでは、たとえ様々な要因でノードが機能を停止したり攻撃を受けてそのネットワークから除去されてしまったとしても、簡単にはネットワーク全体が止まってしまうようにするためには、そもそ

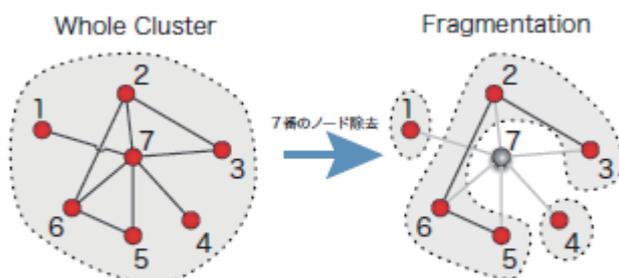


図1. 攻撃によってネットワークが分断される様子

も初めのネットワーク構造がどのようなものであればよいのだろうか。これが「ネットワークの構造最適化問題」である。次節から、この問題をより厳密に定式化し、統計物理学の手法を用いて考察していく。

2-2 問題の定式化

(1) ネットワークの次数分布

ネットワーク構造を特徴づける最も基本的な量は、各ノードの持つリンク数(次数, degree) 分布である。(図2 参照.) 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、昨今、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 ($P(k) \propto k^{-1}$) 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、統計物理学の考え方に従って、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。現実のネットワークでは、各ノードが現在持っているリンク数の大小が新たなリンクを受け入れるかどうかに影響することが起こり得るのであるが、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。

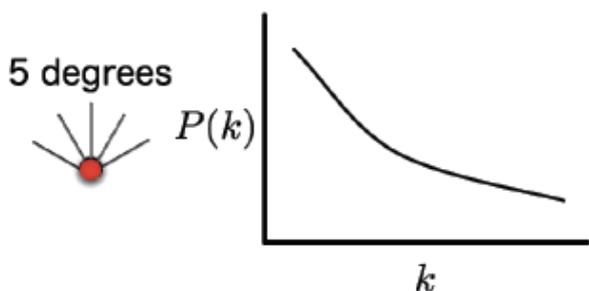


図2. ネットワークの次数分布

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。(図3 参照.) 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

(2) ノード除去閾値

Threshold

f
除去後のネットワーク全体が依然として全体の連結性を保っているという条件下で除去し得るノード数の総ノードに対する比の最大値 (ノード除去の方法に依存する)

$f \approx 1$ robust

$f \approx 0$ fragile

図3. ノード除去閾値

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。

さらに考察を進めるためにはノード除去の方法を具体的に指定しなければならない。ここ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つのタイプに限定する。

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 と呼ぶことにする。

② targeted attack

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 と呼ぶことにする。

(3) ネットワーク構造最適化問題の定式化

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。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

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。

られるものであり、 f_r の上限値 \bar{f}_r 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様なネットワーク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ある意味「いいとこ取り」の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。

2-3 故障にも攻撃にも強いネットワーク構造

(1) ハブの役割

ER ネットワークは各ノードが比較的均質であるために、targeted attack に対するノード除去閾値 f_t はその上限値である $1 - 1/(\langle k \rangle - 1)$ をほぼ実現することができるが、random failure に対するノード除去閾値 f_r を 1 に近づけることはできない。また、スケール・フリー・ネットワークはハブが数多く存在するおかげで f_r はほぼその上限値 1 であるが、同時にハブの存在のせいで f_t が極端に小さい。これらの両方の特徴をうまく取り入れて、故障 (random failure) にも攻撃 (targeted attack) にも強いネットワークは作れないものだろうか。

この問題について、まず問題の本質を捉えた定性的な考察を行ってみる。スケール・フリー・ネットワークの持つ random failure に対する頑強性はネットワーク内に存在するハブのおかげである。ひとつひとつのハブがそれぞれ多くのノードを支配下に置きしっかりと連結性を支えた上で、さらにそのハブ同士も連結しあうことにより、たとえハブにぶら下がっている大多数のノードが故障したとしてもネットワーク全体の連結性は揺るがない。つまり、random failure に対する頑強性にとっては多くのハブの存在は不可欠である。しかし、targeted attack に対しては、多くのノードを支配下に置くハブの存在はまさに絶好の標的 (target) である。一つのハブを除去するだけでそのハブが支配している多くのノードも同時に除去されてしまうからである。従って、故障 (random failure) に強いネットワークを作るためにはネットワーク内にハブが存在しなければならない。しかし、ハブがあまり多すぎると外部からの攻撃 (targeted attack) に対して脆弱になってしまうので、ハブはあまり多く入れてはならない。つまり、攻撃 (targeted attack) に対する頑強性をほとんど損なうことなく、しかも故障 (random failure) に対する頑強性を十分に持つ (ノード除去閾値 f_r がほとんど 1 になる) ような、ちょうどよいハブの入れ方はあるのか、ということが本質的な問題である。

(2) 二極次数分布構造

この問題に対する解答が二極次数分布 (bimodal distribution) である。こ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。

- ① 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。

②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。

③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。

④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。

もちろん、この定性的な考察は定量的な計算によって裏づけられなければならない。幸い、この二極次数分布構造は十分に簡単な形をしているため、 f_r や f_t をすべて解析的に求めることができる。

まず random failure に対するノード除去閾値 f_r は、

$$f_r = \frac{\langle k \rangle^2 - 2r\langle k \rangle k_2 - 2(1-r)\langle k \rangle + rk_2^2}{\langle k \rangle^2 - 2r\langle k \rangle k_2 - (1-r)\langle k \rangle + rk_2^2} \quad (8)$$

となる。次に targeted attack に対するノード除去閾値は $f_t > r$ の場合、

$$f_t = r + \frac{1-r}{\langle k \rangle - rk_2} \left\{ \langle k \rangle \frac{\langle k \rangle - rk_2 - 2(1-r)}{\langle k \rangle - rk_2 - (1-r)} - rk_2 \right\} \quad (9)$$

となり、 $f_t < r$ の場合、

$$f_t = \frac{\langle k \rangle^2 - 2r\langle k \rangle k_2 + rk_2^2 - 2(1-r)\langle k \rangle}{k_2(k_2 - 1)(1-r)} \quad (10)$$

となる。この解析的な表式を用いれば $f_r + f_t$ の値を最大にする r と k_2 の関係を厳密に求めることができる。その結果、最適解を与える k_2 と r の関係は、 r の小さいところで漸近的に、

$$k_2 \sim \left\{ \frac{2\langle k \rangle^2 (\langle k \rangle - 1)^2}{2\langle k \rangle - 1} \right\}^{1/3} r^{-2/3} \equiv Ar^{-2/3} \quad (11)$$

となり、この最適構造を取った場合の二極次数分布を持つネットワークのトータルなノード除去閾値 $f_T = f_r + f_t$ の値は、

$$f_T = \bar{f}_T - \frac{3\langle k \rangle}{A^2} r^{1/3} + O(r^{2/3}) \quad (12)$$

であることがわかる。ここで、 \bar{f}_T はノード除去閾値の合計の絶対的な最大値 $2 - 1/(\langle k \rangle - 1)$ である。従って、確かにこの二極次数分布構造のネットワークは $r \rightarrow 0$ の極限で f_T の絶対的な最大値に限りなく近づいていき、所望の性質をもっていることがわかる。

次に、総ノード数が N 、平均次数が $\langle k \rangle$ である場合に、具体的にどのように r と k_2 を定めればよいのだろうか。式(12) からわかるように、できるだけ r は小さく取るべきである。これは式(11) をみると k_2 をできるだけ大きく取ることと同等である。しかし、あまり k_2 を大きく取りすぎると、ネットワークを作る際に、同じノードを2本以上のリンクで結んでしまったり、自分自身にリンクを張ってしまったりすることが無視できなくなってくる。2本目以降のリンクや自分自身に張るリンクは今考えるネットワークの頑強性には寄与しないため、多すぎる次数を持つハブの導入は無駄である。詳しい考察によれば、 $k_2 \approx \sqrt{\langle k \rangle N}$ を

超えると、このようなことが起こり始めることから、 k_2 の取りうる最大値として、この $k_2 \approx \sqrt{\langle k \rangle N}$ を取ることにしよう。式(11) から、 $r = (A^2 / \langle k \rangle N)^{3/4}$ であることを用いて、式(12) は、

$$f_T = \bar{f}_T - \frac{3\langle k \rangle^{3/4}}{A^{3/2}} N^{-1/4} + O(N^{-1/2}) \quad (13)$$

となる。この場合には、 $N \rightarrow \infty$ において $f_T \rightarrow \bar{f}_T$ となる。

(3) 多極次数分布構造

次に、前節の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式(11)より $r \propto k_2^{-3/2}$ 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_i 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 $f_i \approx 0$ となっている。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。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ち、 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_i 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 $f_T \equiv f_r + f_i$ 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、臨界モード数 m_c が存在し、多極次数分布ネットワークがこの m_c より多くのノード種を含む場合、targeted attack に対するノード除去閾値 f_i がほとんどゼロになってしまい、実質的にスケール・フリー・ネットワークと同じ頑強性（むしろ脆弱性）になってしまうことがわかった。数値計算によれば、この臨界モード数 m_c は、

$$m_c = 1 + (0.62\langle k \rangle - 1.0) \log_{10} N \quad (14)$$

と求められる。総ノード数 $N = 104$ 、平均次数 $\langle k \rangle = 3$ とすると、このときの臨界モード数 $m_c = 4.44$ であるから、4 種類を超えるノード種を含むネットワークの targeted attack に対する頑強性は実質的にはゼロであるということになる。

2-4 まとめ

本章の内容をまとめると以下のようなになる。

- ネットワークを構成する個々のノードの相互に無関連な機能不全 (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 は式(11) で定義されている。

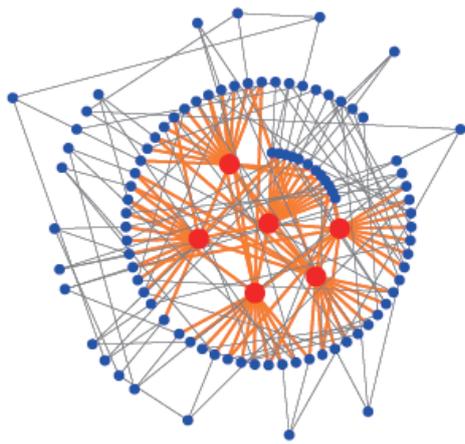


図 4. 総ノード数 $N = 100$, 平均次数 $\langle k \rangle \approx 3$ の場合に最適化された二極分布ネットワーク. この場合, 必要なハブ (赤いノード) は 6 つであり, その次数は 17 である. その他の 94 個のノード (青) は平均次数 3 を持つ.

- 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, 外部からの攻撃に対する頑強性が失われる. この点において, インターネットや北米の電力供給網はノード種数が過多であり, 外部からのハブに対する選択的な攻撃に対してはほとんど抵抗力を持たない. もちろん, これらのネットワークにおけるハブは普段は外部からの攻撃に対して厳重に守られているが, いったんそれらのハブが機能を失うと, 2003 年夏の北米大停電のような事態が容易に起こり得る.

図 4 に総ノード数が 100, 平均次数が約 3 の場合に最も頑強な二極分布ネットワークを示す.

3 ユーザのそばにいつも居てくれるパートナーシステム

ユビキタス環境下において, 影のようにユーザに付きまといながら動画を動的配信するシステムの基本構成を呈示する. 提案システムは, ネットワーク上に IP レベルで自動接続された PC 側に RFID タグ reader を, ユーザ側に RFID タグを実装する. また, 複数のコンピュータのディスプレイで構成される. 我々はパッシブ型の RFID タグシステムを採用した. 動画の配信は適応したブロードキャスト方式を活用する. システムは絶え間なくストリーミングのデータを提供できるので, ネットワーク上の DB サーバと動画配信サーバを介して, 提案システムはユーザが移動するディスプレイに次々と動画を配信することができる. リアルタイムにユーザの位置情報を保持するので, どこでも, その人がいるところでそれらの情報を得るという意識的な要求を必要とせずユーザをサポートできる. 本章はこのフレームワークのプロトタイプ実現と実用化について説明する.

3-1 アプローチ

本節は, ユビキタスコンピューティング環境における, 動画の動的な配信を提供するために現実的なシナリオについて説明する. 我々の究極の目標は広範囲のビル全体の, そして, 街全体の展開である. コントロールと管理機能のすべてが集結される時, スケーラブルな方法でシステムを配布して, 管理するのはほとんど不可能である. その結果, 我々のソフトウェア・システムは複数のサーバから成る. (サーバはピアツーピアで個々のサーバに接続される). 少なくとも 1 つのストリーミングと 1 つのデータベースサーバがシステムを導入するのに必要である. データベースサーバはタグに関する識別子に関する最新情報を維持するだけである.

(1) 信頼できるパートナーシステムのための配送手順

ストリーミングのデジタル・メディアをターゲットホストに提供するのにかかわる手順を説明する. 図 5 は付属 RFID タグリーダと共に我々のシステムと多くのターゲットホストを示している. (システムは RFID によってタグ付けをされたユーザを割り当てる). RFID によってタグ付けをされたユーザが読者の適用範囲の地域に入るとき, ユニークな RFID 識別票はデータベースサーバを通して認証される, そして, ストリーミングのデジタル・メディアは RFID タグリーダの領域のターゲットホストのディスプレイに提供される. RFID によってタグ付けをされたユーザが移動するなら, ストリーミングの配信は, 同じユーザに対するサービスを提供するために同じ適用範囲の地域の中で適切なターゲットホストにわたる.

ストリーミングサーバの IP アドレスは RFID タグとデータベースサーバでターゲットホストに通知する. タグ ID がデータベースに既に登録してあるとき, データベースサーバの上にデータ領域で登録されたアドレスをターゲットホストに返す. ターゲットホストがアドレスを受け取ったとき, それはアニメーション配信をストリーミングサーバに要求する. その結果, ストリーミングサーバのブロードキャスト配信は始められる. ユーザ運動に応じて, 放送はリアルタイムで, それぞれのターゲットホストに流される. ブロードキャ

スト配信はユニキャスト配送と異なっている、そして、それは地球規模のテレビのように伝えられる。これによって、表示端末が変わっても動画の再生時間のズレ等が生じず、シームレスな動画配信が可能になると考えられる。

(2) ネットワーク構成

動画の動的な配送を考えるために、負荷が分配されているのを保証するためにネットワーク構成を分析することが必要である。本節は、我々の提案された配送システムを導入するためにコンピューティング・システムとネットワーク形態を見直す。サーバ/クライアントシステムでのサーバへの負荷集中を避けるため、本システムでは分散型コンピューティング、すなわち P2P システムを適用した。全体的なトポロジの構成は PureP2P を用いる。しかし、他の Peer (クライアント) を検索する時、PureP2P は目的の Peer を発見するのに時間を浪費する。この問題を解決するため、Hybrid P2P の利点であるインデックスサーバ機能を PureP2P の Peer の 1 つに付加することにより検索時間を大幅に減少させる。この機能を持たせた Peer をホストと呼ぶことにする。ホストは IP アドレスと異なった P2P ネットワーク固有の ID を割り当てて管理する。

ここで、我々は P2P ネットワークからホストが外れる時のことを考える。クライアントである Peer は、ただネットワークから除外されるだけだが、ホストである Peer が外れると、P2P ネットワークは崩壊してしまう。この問題に対し本システムでは、ホストが P2P ネットワークから外れるとき、まず他 Peer の 1 つにホスト機能を委任し、それ以外の Peer に新ホストの IP アドレスを教える。そして、新ホストのアドレスを受け取った Peer は、新ホストを基にして新しい P2P ネットワークを構成する。

ところで、我々の提案した配送システムに関してネットワーク形態を考えよう。サーバと Peer ホストは、ダイナミックに配布されて、頻繁に停止するかもしれない。ネットワークを広げることができるようになるように、我々はネットワーク丈夫さを最適化するネットワークデザインを適用した。

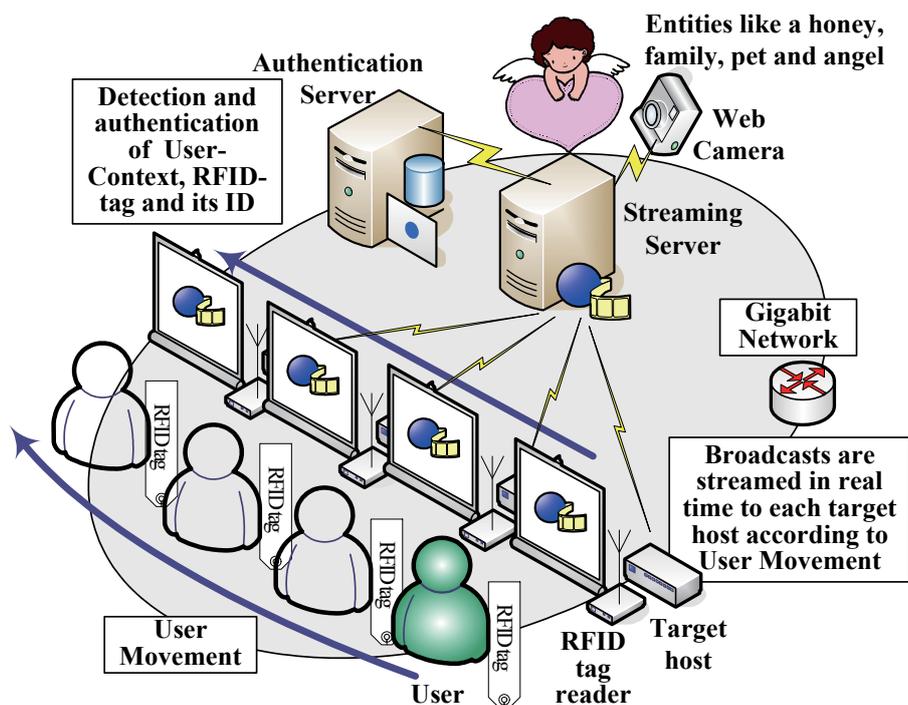


図 5. 動画の動的配送を実装する Reliable Partner System の基本構成

3-2 実装

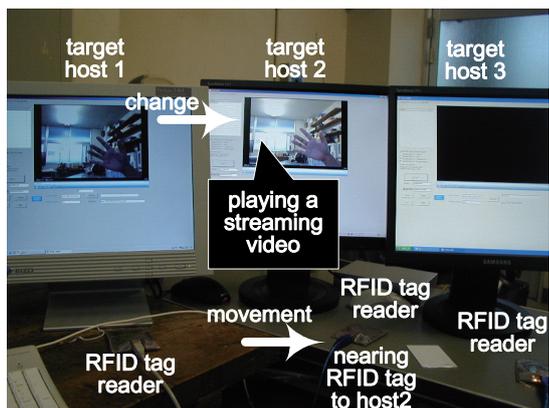
本章で提示されたシステムは、マイクロソフト Visual Basic .NET フレームワークバージョン 1.1 以降バージョンで導入され、Phidget ソフトウェアコンポーネント Phidget SDK を含んでいる。本節は現在の実装のいくつかの特徴について論ずる。

(1) プロトタイプ

現在の実装は Phidget RFID タグリーダとそのタグを使用した。ユニバーサルシリアルバス(USB)を使用する 125kHz の RFID-タグシステムである。Phidgets は扱いやすく、PC から制御できる。すべての Phidgets によるソフトウェア実装は、ユニバーサルシリアルバス(USB) Application Programming Interface(API) を介して行われる。例えば、Visual Basic などですぐにアプリケーションを開発できる。ユーザの認証とサーバのアドレスを参照するデータベースは MySQL を使用した。ユーザ認証が完了したあと、ターゲットホストは動画サーバに動画の配信を要求し、動画サーバからのストリーミングが開始される。ストリーミングサーバは、Windows Server2003 と Windows Media 9 Series を使用して、実際には広帯域のホストのためのバッファリングを排除する新しい Fast Streaming 技術を持っている Windows Media ストリーミングによって作動させられた。つまりデータベースに登録された RFID タグを持ったユーザが動画を配信するホストに近づくと、タグリーダがタグ ID を読取り、タグに対応させたライブ配信をそのホストのディスプレイに描画する。そして、ユーザが移動すれば、移動ユーザの居る場所でタグを読取れるホストが感応し、ユーザに一番近いホストのディスプレイに連続的に描画される。このことから描画するホストが変わってもユーザは常にリアルタイムに動画再生を授受し続けることになる。加えて、動画の再生のタイムラグを生じさせずに継ぎ目ない動画配信が可能となっている。

(2) 性能評価

我々は、実装システムを評価するため、ブロードキャストするターゲットホストを作動させるときのシステム性能を測定した。配信する動画が1つのターゲットから別のターゲットに移行し作動することにおける応答時間を測定した。この実験のために、我々は5台のコンピュータを用意した。Windows Media サーバ、MySQL データベースサーバ、Windows Media サーバは Windows2003Server と Windows Media9 で Pentium4(2.8GHz) 上で動作させた。MySQL サーバは Windows2000 と MySQL 4.0.21-nt と共に Pentium3(1GHz) 上で動作させた。それぞれのターゲットホストは WindowsXP-Professional と MySQL ODBC3.51Driver と共に



(a) プロトタイプの構成



(b) 60 インチスクリーンディスプレイによる実験系

図 6. プロトタイプの構成と大画面ディスプレイ装置を利用した実験

Pentium4(2.8GHz) 上で動作させた。すべてのホストには GeForce6200 ビデオカードを装着させた。システムは 1000BASE-T イーサネット LAN 上で相互接続され、ストリーミング・ビデオは 640×480 画素 (VGA サイズ) のウィンドで Logicool QcamPro4000 Web カメラを用いた。

我々は Gbit LAN を通して接続速度について確かめた。サーバとホスト間の最小スループットは 170Mbps であった。ターゲットホストが動作するまでのタイムラグを測定した。RFID タグを読む時からターゲットホストへストリーミングサーバの IP アドレスを通知するまでの待ち時間は 20~30ms であった、また、TCP 上のストリーミングサーバとターゲットホスト間の Windows Media Player を接続する待ち時間は 180ms であった。システムの作動と状態移行のために必要な合計時間は 210ms となる。この待ち時間は、健康な人の歩く速度に対応できるものである。

(3) 主観的な評価

表 1. ユーザ評価の結果

項目	平均スコア	標準偏差
オブジェクトの明瞭度	4.2	0.98
ユーザ追従のリアリズム	4.4	1.0
システムのレスポンス	4.2	0.69
実体としての存在感	2.9	0.94
本システムの関心度	3.3	1.1

また、図 6(b) に示されているように、我々は図 6(a) と同じ仕様の、より実用的なプロトタイプを実装した。我々は、プロトタイプの主観的な評価を調査するためにアンケート調査を行った。被験者は 20 歳の電気工学の学生 10 人である。彼らは日常生活で PC 操作に慣れている者たちである。実験は、図 6(b) に示されているように、60 インチのスクリーンを横に並べた状態でディスプレイ画面を投影し、2つのデ

スクリーンコンピュータ上で行われた。我々は、彼らがアンケートに書き込む前にどう対象のプロトタイプを使用するかを説明しながら呈示した。その後、主観的評価におけるアンケートは5段階のカテゴリ評価として、より良い=5、少し良い=4、普通=3、少し悪い=2、悪い=1とした。表1はアンケートの結果を示す。カテゴリ評価として、1~5のカテゴリスケールの平均スコアとその標準偏差で表している。オブジェクトの明瞭度、ユーザ追従のリアリズム、システムのレスポンスについては、4.2ポイント以上とかなり高い。一方、実体としての存在感や本システムの関心度は約3ポイント以下とそれほど高くなかった。プロトタイプユーザの評価は、このシステムに対する慣れや親しみと経験によってより良いものになるかもしれない。

3.3 まとめ

本章では、我々は動画の動的な配送をモバイルユーザに提供するためのシステム構成をRFIDベースのトラッキング・システムを使用することによって提案した。システムは、ユーザ位置を検出して、ストリーミング・ビデオをユーザに提供する。RFIDトラッキング・システムとRFIDタグ層アーキテクチャで、システムはターゲットホストかデバイスの位置と環境を追跡できる。さらに、このシステムは様々なユーザ・サポートのために適応的に変化させることができる。実装と実験結果は、データベースサーバとストリーミングサーバを通して、動画として絶え間なくストリーミングデータをネットワーク上に提供することが可能であることを示した。システム性能の有効性を確認する実験では、人の歩行速度に対応する応答時間(待ち時間)が実現できていることを確認した。また、我々は主観的な評価実験でプロトタイプに関するユーザ評価を調査した。被験者は、プロトタイプを効果的であると評価している反面、実体としての存在感が十分でないと感じていることが分かった。

我々は、アウェアネスアプリケーションのためのサービスとして、

- 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
- ユーザのイベントを利用した身の周り支援システム

など、図7に例示するように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など、幾つかの日常生活行動連動型のシステムを実装し、新たな支援モデルの提案・評価を進めている。

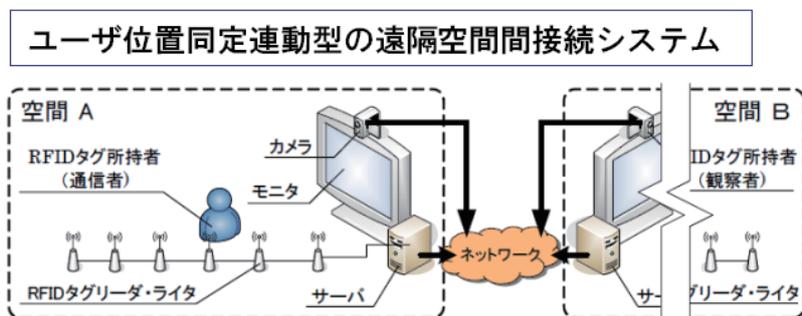


図7. プロトタイプの実装例

4 結言

本研究は、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ドコンピューティング環境下で、オブジェクト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の可用性についての検討を目的として研究を進めた。研究目的に挙げた項目のうち、「Object-aware ネットワークフレームワーク構築とトポロジの理論解析」について研究を進めた。理論的なアプローチとして、ネットワーク上を構成するノードがランダムな確率で機能不全に陥り、なおかつ、外部から次数の大きなノード（ハブ）が選択的な除去を受ける場合に、2極の次数分布を持つ単純なネットワーク構造が最も頑強であることを定量的に示した。さらに、このネットワーク構造と現実世界に広く見られるスケール・フリー・ネットワーク構造がどのような関係を持っているかについての定量的な考察も行った。一方、ユーザ状況と情報の種類（形態）に適合する情報伝送・呈示アプリケーションとして「ネットワーク型相談相手・気づきシステム」のプロトタイプを構築し、適応型アプリケーションとしての幾つかの発展形を呈示した。

4.1 今後の方向性

今後は共同研究者との連携をさらに深めながら、以下について研究を進める。

○ネットワークトポロジとその安定性の理論的な要件異種間ネットワークの相互接続を想定しつつ、膨大な数のノードが頻繁につなぎ替えをするようなネットワークにおけるノード間通信の安定性、あるいはネットワーク構造の安定性などについて、理論的考察と実際のテストネットワーク上における検証を行う。

○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ライブカメラ画像などによる離れた空間間コミュニケーションをより自然にするとともに、同一空間のように振舞わせるアウェアネスでアンビエントな呈示手法や情報伝送手法の検討を行う。

4.2 ネットワーク理論のこれから

統計物理学の手法を用いたネットワークの頑強性や構造最適化に対する研究は始まったばかりであり、まだまだやるべきことが残されている。特に現実のネットワークの含むノード数は統計的手法が厳密に当てはまるほど膨大でもないが、かといって一つ一つのネットワークを個別に調べられるほど少数でもない。そのような、いわば中間的なノード数を持つ現実のネットワークに対して定量的な予言ができるような理論的考察はあまりない。いろいろなネットワーク構造の物理的な性質を解明すると同時に、さまざまなスケールのネットワークを統一的に理解する枠組みの構築が必要である。

さらに、現実のネットワークでは、ノード間にリンクを張る際に、距離的・空間的・金銭的制約などから、何らかの制限が入ってくることが避けられない。これは、ネットワーク生成の際にノードの次数間に相関関係が存在することと同等であるが、現在のところ、次数相関を積極的に取り入れたネットワーク理論は多くはない。理論が現実のネットワークに対して何か意味のある予言をする上では、この次数相関を取り入れたネットワーク理論を作り上げることも必要になってくる。

【参考文献】

- 1) アルパート・ラズロ・バラバシ:新ネットワーク思考—世界のしくみを読み解く, NHK 出版(2002)
- 2) ダンカン・ワッツ:スモールワールド・ネットワーク—世界を知るための新科学的思考法, 阪急コミュニケーションズ(2004)
- 3) 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
- 4) G. Paul, T. Tanizawa, S. Havlin, and H. E.Stanley, “Optimization of Robutness of Complex Networks,” Eur.Phys.J.B 38, 187 (2004), and its Erratum.
- 5) T.Tanizawa, G.Paul, R.Cohen, S.Havlin, andH. E. Stanley, “Optimization of Network Robustness to Waves of Targeted and RandomAttacks,” Phys.Rev.E 71, 047101 (2005)
- 6) T. Tanizawa, G. Paul, S. Havlin, and H. E.Stanley, “Optimization of the robustness of multimodal networks,” Phys.Rev.E 74, 016125 (2006)
- 7) Weiser, M.: The Computer for the 21st Century, Scientific American, (1991) 94–104
- 8) Yamada, S. and Kamioka, E.: An Overview of Researches on Ubiquitous Computing Networks, NII Journal, Vol. 5 (2003) 41–47 (in Japanese)
- 9) Satoh, I.: Linking Physical Worlds to Logical Worlds with Mobile Agents, Proceedings of International Conference on Mobile Data Management (MDM 2004), IEEE Computer Society (2004) 332–343
- 10) Kindberg, T. and et al.: People, Places, Things: Web Presence for the Real World, Technical report hpl-2000-16, HP Laboratories (2000)
- 11) Harter, A. Hopper, A. Steggeles, P. Ward, A. and Webster, P.: The Anatomy of a Context-Aware Application, Proceedings of Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM’99), ACM Press (1999) 59–68
- 12) Satoh, I.: Physical Mobility and Logical Mobility in Ubiquitous Computing Environments, Proceedings of International Conference on Mobile Agents (MA’02), Vol. 2535. Springer (2002) 186–202
- 13) Takahashi, S., Akamatsu, J., Yamaguchi, T. and Shimamura, K.: An AV file repeated delivery using plural cooperable passive RFIDs based on a layered data architecture, Proceedings of the IEICE General Conference (2005) 305 (in Japanese)

- 14) Tanizawa, T., Paul, G., Havlin, S. and Stanley, H. E., "Optimization of the Robustness of Multimodal Networks", Phys. Rev. E. 74 (2006), 020608
 15) Phidgets, INC. <http://www.phidgetsusa.com/>

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Reliable Partner System Always Providing Users with Companionship Through Video Streaming	Springer-Verlag LNCS, Vol. 4552, pp. 1010-1018	2007年7月
Structure Optimization of Complex Networks	STATPHYS23	2007年7月
複雑ネットワーク科学の拡がり：2. 故障と攻撃の両方に強いつながり方とは？-ネットワークの機能不全と構造最適化-	情報処理学会誌, Vol.49 No.3, pp. 50-57	2008年3月
傾きと距離検出による遠隔空間情景取得に関する一検討	Human Interface Symposium 2007, pp.1105-1108	2007年9月
Collaborative Learning System providing Interactive Lesson through Tablet PCs on WLAN	Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies(APSITT)2008	2008年4月