

CarpetLAN: 人体通信を用いた屋内向け 無配線ネットワーク&位置検出システム

福 本 雅 朗[†] 品 川 満^{††}

CarpetLAN は、まったく新しい屋内向け無配線ネットワークシステムである。床面と人体をイーサケーブルとして用い、弱電界を用いた高速通信 (10 Mbps) を行う。ウェアラブル機器の使用 (歩きながら通信可能) のほかにも、家庭やオフィスのコンピュータや家電機器等を「置くだけで」簡単にネットワーク化できる。電波ではなく弱電界を用いることで、周囲空間への漏洩が少なく、セルサイズを極小化できるため、狭空間での大人数での使用に向いているほか、建物の中での人やモノの位置を、1 メータ程度の精度で把握することができる。

CarpetLAN: A Unwired Indoor Networking and Positioning System Using Intrabody Communication

MASAAKI FUKUMOTO[†] and MITSURU SHINAGAWA^{††}

CarpetLAN is a new indoor Unwired networking and positioning system. It uses the floor surface and the human body as an Ethernet-cable, and weak electric fields as the transmission media. Portable and wearable devices can connect to the network while the user stands or walks on the floor; connection speed is 10 Mbps. Home and office appliances can also access the network if they are just put on the floor. Electric field based transmission system yields ultra-micro communication cells, so the positions of humans and appliances can be detected with about 1 meter accuracy.

1. はじめに

ポータブル、モバイル、ウェアラブルと続く情報機器の小型化と、携帯電話や無線 LAN 等のネットワークシステムの発達によって、我々が生活時間の中でネットワークに接続している時間は飛躍的に長くなってきた。近い将来、人はつねに情報機器を身に着け、ネットワークを自分の頭脳や知識の一部として活用しながら生活するようになるだろう。その先には、人やコンピュータはもちろん、身の周りのすべてのモノがつねにネットワークに接続され、居ながらにして世界の隅々まで把握できる「ユビキタス」な世界が来ようとしている。

すでに多くの建物や部屋自体には、ネットワークが張り巡らされている。しかし、ユビキタスな世界を実現するためには、そこで生活する人々が持つ機器や、身の周りのモノすべてをネットワークに接続しなく

てはならない。このように、各部屋に来ているネットワークに人やモノをどうやって接続するのが「ラスト 1 メータ」といわれている問題である。無線 LAN や Bluetooth 等の近距離無線通信は、ラスト 1 メータの解決に有効な手段の 1 つであるが、これらはいずれも「電波」を用いているために、本来不要であるはずの機器どうし「以外」の空間にも広がってしまう。特に、オフィスやイベント会場等、多数の人々が狭い場所に集まるような空間では、1 人あたりに配分されるバンド幅が非常に狭くなってしまふ。基地局を密に配置し、基地局あたりのサービスエリアを狭くするマイクロセル化は、1 人あたりのバンド幅を上げるのに効果的な手法であるが、電波を用いている以上、たとえ出力や指向性を工夫したとしても、極端に小さなセル (数メータ以下) を隙間無く敷き詰めるのは困難である。周囲への漏洩が少ない光空間伝送は、この問題を解決する 1 つの手段であるが、個々が勝手に移動する多数の人々をつねにトラッキングし、通信ビームを当て続けることは容易ではない。

一方、ユビキタス世界を実現するうえで残されたもう 1 つの問題が「(屋内での) 位置獲得」である。す

[†] NTT ドコモマルチメディア研究所

NTT DoCoMo Multimedia Laboratories.

^{††} NTT マイクロシステムインテグレーション研究所

NTT Microsystem Integration Laboratories.

で屋外では、GPS システムによって、地球規模でメータ精度での位置獲得ができるようになっているが、GPS の電波は屋内や地下には届かない。屋内における位置獲得の手段としては、主に前述の無線 LAN が用いられているが、基地局あたりのサービスエリアが広い「この部屋」程度の精度しか得られない。複数の基地局の電波強度を用いるシステムも提案されている¹⁾ が、部屋内の家具や人間等の干渉のために、安定した位置検出が難しい。より精度の高い位置獲得システムとしては、超音波や赤外線を使うものがある。超音波方式²⁾ は、数センチ程度の精度が得られるが、検出範囲が比較的狭く障害物にも弱い。さらに、位置獲得のためだけに多数のセンサを部屋や建物全体に配置することはコスト的に難しい。赤外線³⁾ を用いた手法は、位置獲得だけでなくデータの高速送受も可能ではあるが、サービスエリアが非常に狭く、特定のアクセスポイントでの使用に限られている。このように、ユビキタスな世界の実現に必要な、屋内における移動する個人や各種家電製品を対象とした高速通信や位置獲得の効果的手法はいまだ確立していない。

本論文では、これらの課題を解決する手法として、床面や人体を伝送路として用いる方式を提案する。人物が身に着けた携帯機器と、床に敷き詰められたカーペット型ネットワークが、その場所に立っている人間の体を通じて結合し、データ伝送が可能になる。機器を把持、あるいは装着している人体を伝送路として利用することで、明示的に線を接続せずに済むため、ワイアレス機器と同様の簡便さで通信が可能である。また、コンピュータや家電等の「モノ」の場合は、直接床に「置く」だけでネットワークに接続することができる。弱電界を用いた接触通信のため、電波に比べて周囲への「漏れ」を低く抑えることが可能であり、カーペットサイズを調整すればマイクロセル化による同時大人数使用も容易に行える。また同時に、屋内での機器の設置場所を、カーペットサイズ(約1メータ)の精度で把握することができ、ラスト1メータと位置把握という従来の問題点を一気に解決可能である。

以下、2章では、本方式の通信原理について述べる。光学結晶を用いた電界センサを用いることで、従来困難であった通信距離の延長と、10 Mbps の高速データ通信を実現している。また、シミュレーションによって各種通信状態における電界分布を把握し、実際の測定結果とあわせて、メータ単位でのマイクロセル化が可能なことを示す。

3章では、本方式を用いたネットワークと位置獲得手段について述べる。床面に設置されたノード機器を

タイルカーペットのように敷き詰めることで、自己組織型のネットワークを形成するとともに、カーペットサイズの精度で携帯機器の位置検出が可能となる。また、効果的なトラフィック制御を行うためには、移動体である「人間」の運動特性の把握が不可欠であることから、人間の運動特性の測定に基づき、移動予測によるパケット配送を行う。

4章では、製作した CarpetLAN 実験システムを示し、接続構造把握、ハンドオーバ、位置推定、ならびに移動予測によるパケット配送の効果についての実験結果を示す。また、現時点での課題と可能な解決策について考察を行うとともに、今後の展望を述べて結びとする。

1.1 関連研究

床やテーブル等の物体表面を用いたセンシングおよびネットワーク機構はいくつか提案されている。*Smart-Skin*⁴⁾ と *DiamondTouch*⁵⁾ は、指・手・腕等が触れた位置や領域を電界や容量の変化としてとらえる。*WeightTable*⁶⁾ や *Active Floor*⁷⁾ は、テーブル上の物体や床上の人体の位置を、テーブルや床下に埋め込まれた複数のロードセルの信号処理によって検出する。*MagicCarpet*⁸⁾ は人物の足の位置を PVDF ワイヤのマトリクスによって検出する。これらのシステムはテーブルや床面における物体の位置を検出できるが、使用されているセンサや接続ワイヤはモジュール化されておらず、大きさや形状が多彩な実際の部屋に適用するには問題があった。

一方、ブロックやタイル状のモジュール形式のシステムは拡張性に優れ、敷設が容易である。また、モジュール間の結合状況から部屋全体の形状を知ることできる。*Z-Tile*⁹⁾ はネットワーク化された圧力センサユニットで床面をおおうことで、物体の位置情報を得ることができる。また、*Triangles*¹⁰⁾ は、複数のタイルの接続情報を検出できる。しかしながら、従来のシステムは床面のセンサ情報とモジュール間の接続情報を伝えるだけであり、その上に置かれた物体や人物との間でデータの送受を行うものではなかった。一方、*Magic-Surfaces*¹¹⁾ は、磁気結合を用いて床面に置かれた物体の設置位置や方向の検出とともに、物体との双方向通信も実現している。しかし、人体は磁界の伝達経路としてはほとんど利用できないので、人が持つ PDA 機器や、装着された HMD 等、床面から離れた位置の物体との通信は困難であった。

2. システム構成

本章では、通信システムの構造について述べる。図1

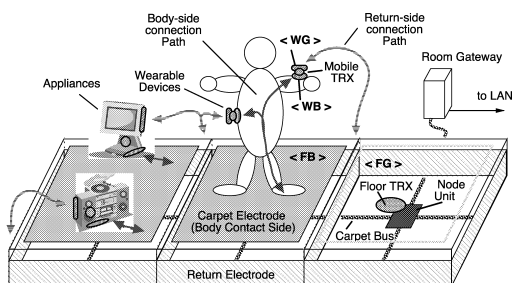


図 1 CarpetLAN システム構成．それぞれのカーペットユニットはネットワークセルとして動作する

Fig. 1 System architecture of CarpetLAN.

に通信機構の概略を示す．人物が把持している携帯機器には，人物の肌に触れる側（以下 WB 電極）と，触れない反対側（以下 WG 電極）に 1 組の電極が設置されている．また，人物が立っている床面には，直接足が触れている床面（以下 FB 電極）と，その周囲で直接足が触れない位置（以下 FG 電極）に電極が設置されており，床面の区画ごとに設置されたノードを介して外部ネットワークにつながっている．

携帯機器から床面機器に対して通信を行う場合には，携帯機器に設置された電極間（WB-WG）に高速でスイッチングする電位差を与える．現在のシステムでは，Ethernet（10Base-T）と同じ 10 Mbps のベースバンド変調を用いている．また印加電圧は約 25 V である．電極間に印加された電圧によって，周囲には電界の変化が発生する．人体は，数十 kHz を超える周波数に対しては良い導電性を示すので，電界の一部は，電極 WB に近接している人体を電線として伝わり，足が近接している床面電極 FB に結合する．一方，電極 WG は空間に向かって設置されているため，周囲の空間に向かって電界を放射する．この放射は人体側に比べて非常に弱い，そのごく一部は空間を伝わり，床面電極 FG に結合する．これによって，携帯機器 - WB - 人体 - FB - 床面機器 - FG - 空間 - WG - 携帯機器，という信号のループが完成し，送信信号に応じた電位差が電極 FB-FG 間に現れる．この電位差を復調することで，双方の機器間で通信が成立する．床面機器から携帯機器に通信を行う場合は送受信が逆になる．

しかし，発生した電界の多くは発生側の電極（ここでは WB-WG）間で閉じてしまい，上記のループ形成に寄与する成分はごく一部にすぎない．したがって，この通信方式が成立するためには，電極間に生じたわずかな電界の変化を検出できる，超高感度の電界センサが必要となる．

2.1 人体通信

人体を用いた弱電界通信方式は，主に “Intrabody

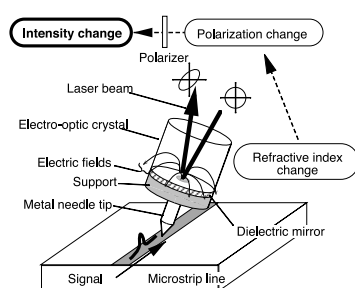


図 2 EO 電界センサ．電界変化をレーザの偏光変化としてとらえる

Fig. 2 EO sensor.

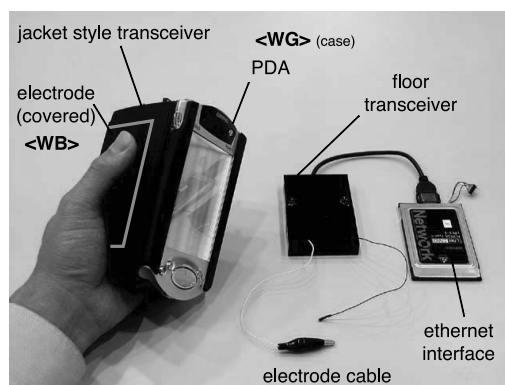


図 3 トランシーバ (L) 携帯型 (PDA ジャケットに設置) / (R) 床面設置型

Fig. 3 Transceivers.

Communication（人体通信）と呼ばれている．多くのシステムは電界検出素子に FET（電界効果トランジスタ）を用いている．しかし，FET の感度はそれほど高くなく，靴の中敷きに敷いた機器間（大地グラウンドの結合が強い）での通信¹²⁾のほか，手首から指先までの短距離通信^{13) - 15)}等，通信可能な状況が限られていた．また FET には，ポータブル機器等，大地グラウンドから「浮いた」状態では，高速データ伝送が困難になるという問題もあり，通信速度は 1,200 bps-40 kbps 程度にとどまっていた¹⁶⁾．

これに対し CarpetLAN では，電界検出素子に電気光学センサ (EO センサ) を用いることで，これらの問題を解決している．EO センサは，電界をレーザ光の偏光変化としてとらえるデバイスであり，高感度かつ高速動作が可能という特徴を有している^{17), 18)} (図 2)．図 3 に，携帯機器一体型のトランシーバ装置 (左側：PDA ジャケットに組み込み．背面に電極を設置)，および床面設置側のトランシーバ装置 (右側：小さい黒箱) を示す．これらのトランシーバ装置は，10Base-T (半 2 重) の Ethernet 互換として動作する．なお，すべての電極は絶縁物で覆われており，人体とは直接接

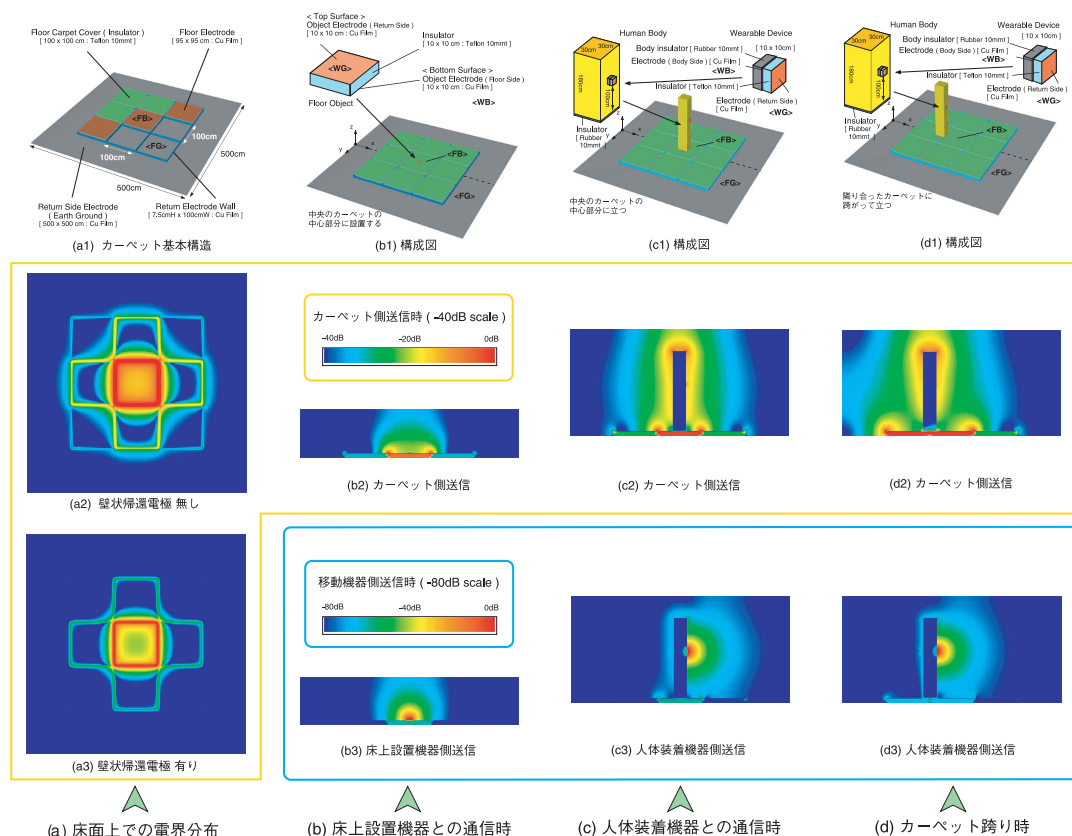


図 4 CarpetLAN における電界分布シミュレーション。カーペット側からの送信で生じる電界は、床上設置や人体装着からの送信に比べて約 30 dB 大きい

Fig. 4 Electric field simulations of CarpetLAN.

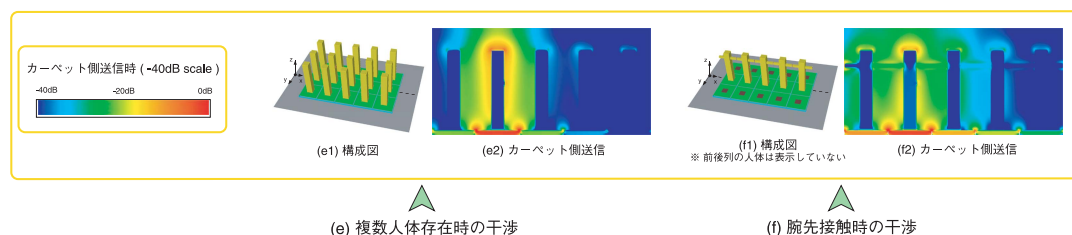


図 5 複数人体存在時の電界分布シミュレーション（後述）。混雑時には、2 つ隣のセルまで干渉が及ぶ

Fig. 5 Electric field simulations (multiple human bodies).

触しない。また、送信時に人体に励起される誘導電流は、日常生活にともなう生じるとものと比べても微弱である。

2.2 電界分布シミュレーション

本節では、シミュレーションを用いて、通信時の床面および人体周辺の電界分布を明らかにする。人体通信に関する電界シミュレーションは、過去にも行われている¹⁹⁾が、腕から手先までの狭い範囲にとどまっており、人体全体や床面を含めた広範囲のシミュレーションは行われていない。

2.2.1 セル間分離

シミュレーションに用いたカーペットの基本構造を図 4(a1)に示す。1 つのカーペットは $100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ の広さを持つ。カーペットの床面側電極（銅： $\rho = 5.8 \times 10^7\text{ S/m}$ で近似）のサイズは、隣接電極とのショートを避けるために $95\text{ cm} \times 95\text{ cm}$ と少し小さくされており、大地からは 10 cm 浮いている。床面側電極の上部は、厚さ 10 mm の絶縁体（天然ゴム： $\varepsilon_r = 2.4$ ， $\rho = 0.067\text{ S/m}$ で近似）でカバーされている。大地は $500\text{ cm} \times 500\text{ cm}$ の金属面（材質：銅）として近

似しており、これらは帰還側電極としても動作する．縦横 3×3 の大きさにカーペットを敷いた状態を想定し、市販の電磁界解析ソフトウェア を使用してシミュレーションを行った．なお、解析のメッシュサイズは、25 mm 間隔を基本とし、電極付近等では 10 mm 間隔に狭めて精度を高めている．

図 4(a2) に、中央のカーペットの床面側電極と帰還側電極 (= 大地) 間に 3 V の電圧を加えた状態の電界分布を示す．本図は、床面カーペットの上面 ($z = 11$ cm) で大地と水平に切り取った状態を示している．電界強度は、印加電界強度である 30 V/m を 0 dB として正規化し、 -40 dB までのスケールで表示している．なお、解析周波数は実機に倣って 10 MHz とした．本図から、中央のカーペットの端面では -3.5 dB (20 V/m)、中心付近では -14 dB (6 V/m) の電界が生じている．しかし、隣接するカーペットの外側境界線付近にまで -17 dB (4 V/m) 程度の電界漏洩が生じており、カーペット間の電界分離が不完全である．

次いで、図 4(a3) に、各々のカーペットの境界に長さ 100 cm、高さ 75 mm の帰還側電極 (図 4(a1) 参照) を井桁状に設置した状態を示す．帰還側電極を入れたことで、カーペット上面の電界強度も減少し、中央のカーペット端面で -9.5 dB (10 V/m)、中心付近で -20 dB (3 V/m) となる．しかし、隣接するカーペットの外側境界線付近への漏洩は -26 dB (1.4 V/m) 程度に抑えられている．一方、隣接カーペット上面への漏洩は、中央部では -40 dB (450 mV/m) 以下であり、セル中心部では約 20 dB のセパレーションが得られている．

このように、隣接カーペット間の隙間部分に、帰還電極で壁をつくることで、隣接セル (カーペット) 間のセパレーションを確保できる．なお、以後の解析ではすべて、壁状帰還電極を有する構造を用いている．

2.2.2 床上設置機器との通信

次いで、カーペット床上に通信相手となる送受信機 (以下、床上設置機器) を置いた場合を想定したシミュレーション結果を示す．中央のカーペットの中心部分に、床上設置機器の送受信機を模して、縦横 10 cm の極板を 2 枚、厚さ 10 mm の絶縁体 (テフロンで近似: $\epsilon_r = 2.16$, $\rho = 0$ S/m) を挟んで設置した．構造を図 4(b1) に示す．

図 4(b2) は、前回のシミュレーションと同じく、中央の床面電極間に 3 V の電圧を印加した状態を、床上設置機器の電極を切断する垂直面 ($y = 0$) で示している．

そのほかの表示条件は前回と同一 (30 V/m = 0 dB, -40 dB スケール) である．これによれば、床上設置機器の電極間に誘起された電界は -25 dB (1.6 V/m) である．

仮に受信機の極板間の距離が 10 mm であれば、極板間に 16 mV 程度の電圧が得られることになる．本論文で用いている EO センサの性能から最小検出電界を見積もると、単位帯域あたりの最小検出電圧は $5 \mu\text{V} * \sqrt{(Hz)}$ となる．仮に帯域幅を 500 kHz とすると、最小検出電圧は 3.5 mV 程度となり、十分に検出が可能である．

次に、床上設置機器からカーペットへの通信について示す．図 4(b3) は、床上設置機器の 2 枚の電極間に 3 V の電圧を印加した状態を示している． 0 dB 基準 (30 V/m) は前回と同一であるが、スケールを -80 dB に広げている．これによれば、床上設置機器によって中央のカーペット下部に誘起された電界は、 -59 dB (35 mV/m) 程度と小さく、 10 cm 離れた 2 枚のカーペット極板間に生じる電圧は 3.5 mV にとどまる．これは前述のカーペットから床上機器方向に向けた場合に比べ、 30 dB 以上も低く、検出限界ぎりぎりである．安定した双方向通信実現のためには、カーペット側の受信機に、より高い感度が必要である．

なお、図 4(b2) によれば、中央のカーペットから発信した場合、隣接したカーペットへの電界の漏洩が発生している．漏洩の大きさは、 -31 dB (850 mV/m) 程度であり、自身の床上に設置された機器からの正規の通信に比べて約 30 dB も高く、レベル差だけでは分離できない．しかし、隣接カーペットからの混信は、各カーペット内に設置されたノード機器によって除外可能 である．

2.2.3 人体装着機器との通信

次いで、カーペット床面に人間が立った場合を想定してシミュレーションを行った．人体のサイズを高さ 180 cm、幅と奥行きをともに 30 cm とし、材質の電気定数を、筋肉と同じ $\epsilon_r = 81$, $\rho = 0.62$ S/m とした¹⁹⁾．人体への送受信器 (以下、装着機器) の取り付けは、腰の部位を想定し、足元からの高さ 96 cm に、床上設置と同じもの (縦横 10 cm、厚さ 10 mm) を配置した．なお、人間の足の底には、靴底を模した厚さ 10 mm の天然ゴム ($\epsilon_r = 2.4$, $\rho = 0.067$ S/m) を設置している．また、装着機器と人体との接触部分にも厚さ 10 mm の天然ゴムを設置しており、電極は人体とは直接接触していない．構造を図 4(c1) に示す．

図 4 (c2) は、前回のシミュレーションと同じく、中央の床面電極間に 3 V の電圧を印加した状態を、人体装着機器の電極を切断する垂直面 ($y = 0$) で示している。表示条件は図 4 (b2) と同一 (-40 dB スケール) である。これによれば、人間の身体を取り囲むように電界が分布しており、装着受信機の電極間に誘起された電界は -19 dB (3.5 V/m) になる。これは、床上設置受信機 (1.6 V/m) の場合と比べても倍程度大きい。床面からの距離が離れているにもかかわらず、大きな電界が誘起されており、人体が信号伝達経路として有効に働いている。

次に、装着機器からカーペットへの通信について示す。図 4 (c3) は、装着機器の 2 枚の電極間に 3 V の電圧を印加した状態を示している (-80 dB スケール)。床上設置機器のときと同じく、装着機器によってカーペット下部に誘起された電界は、-58 dB (39 mV/m) 程度と小さく、カーペット側の受信機に高い感度が要求される点も同様である。

2.2.4 カーペットまたぎ

最後に、2 枚のカーペットにまたがって人間が立った場合を想定し、隣接するカーペットの境目に、半分ずつ身体を乗せた状態でシミュレーションを行った。そのほかの条件は前回と同様である。構造を図 4 (d1) に示す。

図 4 (d3) は、装着機器の 2 枚の電極間に 3 V の電圧を印加した状態を示している (-80 dB スケール)。2 枚のカーペット下部に誘起される電界は -64 dB (18 mV/m) であり、単一のカーペットに比べて半分になる。カーペット下部のセンサの感度に余裕があれば、「またがっている」ことを検出できる。

2.3 カーペットユニット

前節で得られたシミュレーション結果をもとにして、カーペットユニットを製作した。図 6 に、製作したカーペットユニット (1 個) を示す。ユニットのサイズは縦横それぞれ 1 m であり、厚さは 10 cm である。ユニットは木製であり、蓋の部分には床上電極として $90\text{ cm} \times 90\text{ cm} \times 0.3\text{ mm}$ の銅シートが設置されており、その上部に絶縁体として $90\text{ cm} \times 90\text{ cm} \times 2.3\text{ mm}$ のビニルフロアが設置されている。また、シミュレーションの結果有効性が確認された帰還電極として、ユニット内側の 4 側面に $90\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 0.3\text{ mm}$ の金属板が設置されている。

本カーペットユニットをシミュレーションと同様の 3×3 の大きさで並べ、中央のカーペットユニットに設置した発振器から 10 MHz のサイン波を発生させた場合の、各カーペットの上面中央部、ならびに各カー

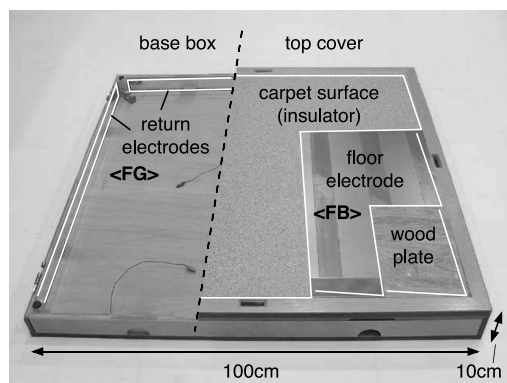


図 6 カーペットユニット (左) 壁状帰還電極 / (右) 床面電極 (絶縁体でカバー)

Fig. 6 Carpet unit.

-26.5	-27.5	-27.0	-26.5	-26.9	-26.0
-28.3	-5.2	-28.3	-26.5	0	-27.6
-26.8	-28.0	-26.7	-26.7	-26.3	-26.7

(a) At the floor-surface

(b) At the human-waist

図 7 電界強度測定結果 (3×3 ユニット). 約 20 dB のセル間分離が確保されている

Fig. 7 Electric field strength.

ペット中央部に立った人物の腰部分 (床面から 100 cm) での信号強度を図 7 に示す。本図によれば、シミュレーションと同じく、隣接するカーペットとの間で 20 dB 以上のセパレーションが得られている。また、本図 (a) および (b) の中央部の値から、床上設置時よりも人体腰部分での電解強度が 5 dB 程度上回っているが、これも同様にシミュレーション結果と一致している。

製作した CarpetLAN トランシーバ装置の評価を次に示す。本論文で述べている「人体通信」型の通信機構においては、大地グラウンドと機器の関係が重要になる。たとえば、双方の機器が AC 電源に接続されている場合や、ケーブルでほかの機器と接続されている場合には、大地グラウンドとの結合が強固になるため、信号強度が 25 dB 程度上昇する²⁰⁾。片方の機器をバッテリー動作かつケーブルレスにした場合でも、機器筐体がい大きい場合には、筐体と大地グラウンド間の結合が強くなるために、目的とする携帯型機器の通信状態を再現できない。また、製作したトランシーバ装置は、

ANDO AQ7710 使用。測定値中の最大項目を 0 dB として正規化している。

図 4 (a3) の中央カーペットおよび周辺カーペットの中央部の電界強度値参照。

図 4 (b2) の中央カーペット床上中央部と、図 4 (c2) の人物腰部分の電界強度値参照。

Type	Object (floor surface)		Wearable (waist)	
Direction	floor → object	object → floor	floor → wearable	wearable → floor
Error rate	4%	23%	3%	12%

図 8 パケットエラー率. 100 個の UDP パケット (64 バイト長) で測定した

Fig. 8 Packet error rate.

携帯型が PDA のジャケット組込式, 床面設置型が改造 PC カード形式である. したがって, ネットワークケーブルや AC 電源駆動のネットワークアナライザを接続することができない. さらに, 使用した PDA の OS では, ネットワーク層の詳細制御ができないため, 伝送遅延等の計測も困難である.

そこで, 現状の実験機器で測定可能な手法として, UDP パケットを用いたエラー率での測定を行った. 結果を図 8 に示す. 携帯機器 (図 3 参照) をカーペット上部中央に設置した場合 (object), および腰の部分に設置した場合 (wearable) に, カーペット下部のトランシーバ (floor) との間で, UDP パケット (64 byte 長) の到達率を示した. パケットは連続して 100 回送信を行い, 受信に失敗した回数を%で示した. 本図によれば, 床面 (floor) から携帯機器 (object, wearable) 方向へのパケットのエラー率は 3-4%である. 一方, 携帯機器 (object, wearable) から床面 (floor) 方向では, 12-23% のパケットロスが生じている. これは, シミュレーションや実測値で示されているように, 床面側送信に比べ, 携帯機器側送信の場合の電界強度が 30 dB 程度小さいことが原因であると思われる. また, 床上設置 (object) より, 腰部設置 (wearable) の方が, どちらの方向ともエラー率が高いが, これは図 7 に示すように, 腰部設置に比べて床上設置の場合の電界強度が 5 dB 程度低いことが原因だと考えられる. 今後, 受信機の感度向上によって, パケットロスを低減させることができると考えられる.

次いで, パケット長に対するエラー率の変化を計測した. 計測は, カーペット上部中央に設置した携帯機器からカーペット下部へ方向 (object → floor) でを行い, UDP パケットの長さを 64 bytes から 10 kbytes まで変化させた. 結果を図 9 に示す. 本図によれば, パケット長が 1 kbytes 以下の場合にはエラー率の低下は少ないが, それ以上ではパケット長の増加に従ってエラー率が上昇し, 10 kbytes 以上では通信が困難になっている.

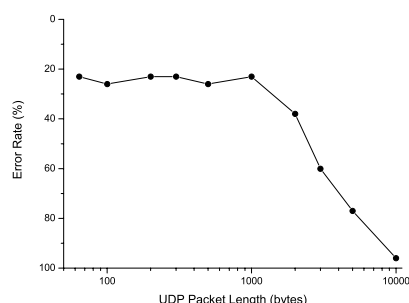


図 9 パケット長に対するエラー率. object → floor 方向で測定した

Fig. 9 Packet length and error rate.

この原因としては, 外来ノイズの影響が考えられる. 現在のシステムでは, 回路構成を単純にするために, 既存の Ethernet (10Base-T) と同じ変調方式 (ベースバンド伝送) を用いている. ベースバンド伝送は, 本来はツイストペアやシールド等, 通信路の品質が確保しやすい有線通信に適した方式であり, 波形歪みや外来ノイズに対しては耐性が少ない. 一方, 人体通信は, 原理的にハムやスパイク等の外来ノイズの影響を受けやすいと考えられる. パケット長が長くなれば, 通信中に外来ノイズによる妨害を受ける可能性が高くなり, 結果としてエラー率も上昇する.

無線通信の世界では, 多くの変調方式が提案されており, それぞれ単位帯域幅あたりの通信容量やノイズ耐性が異なる²¹⁾. 今後, 人体通信におけるノイズ特性を明らかにし, より適した通信方式の検討を行っていく必要がある.

3. ネットワーク構成&位置検出機構

CarpetLAN は, 床面機器を敷き詰めることで, 部屋や建物等の屋内空間全体を network reachable にすることができる. 本章では, 敷き詰め型機器に適したネットワーク構成と, これを用いた位置獲得方式について述べる. また, 人体という移動物体に適したパケット配送位置予測について, 実装に必要な基礎的定数を実験によって求める.

従来のモジュール型床面ネットワークは, 単一形状のセルを空間中に多数敷き詰め, セル間でパケットリレーを行うことで情報伝達を行っている^{9),10)}. しかし, 実際に部屋や廊下にこれらの方法でネットワークを敷設しようとすると, 以下の問題が生じる.

● 伝送遅延:

すべての伝送を単一レイヤのパケットリレーで行う方式では, 大規模化にともなう遅延の増加が問題になる. 仮に 1 ホップあたり 1 msec の転送時間

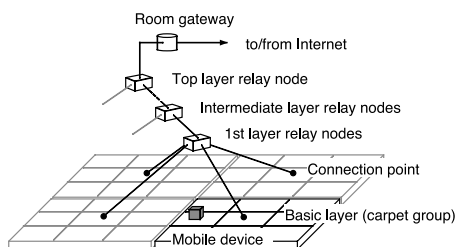


図 10 CarpetLAN のネットワーク構成．カーペットグループと階層化リレーノードで構成

Fig. 10 Structure of CarpetLAN network.

表 1 グループとレイヤーのサイズによる通信遅延の変化．大規模（65,536 個）ネットワークでも通信遅延を短く抑えられる

Table 1 Group and layer size and communication delay (65,536 carpets).

グループ サイズ	256× 256	128× 128	64× 64	32× 32	16× 16	8× 8	4×4	2×2	1×1
レイヤ数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
中継ノード	0	1	5	21	85	341	1365	5461	21845
遅延 (ms)	512	258	132	70	40	26	20	18	16

が必要だと仮定すると，1 m 角の正方形セルを敷き詰めた 100 m 角の部屋の対角どうしの通信には，片道 200 msec 必要となり，IP 電話等リアルタイム系の通信は困難になる．

● 自由形状への対応：

部屋や建物の形状は様々である．正方形や六角形等の単一形状セルのみでは，すべての空間に隙間なく敷き詰めることは困難になる．

3.1 階層型ネットワーク

CarpetLAN では，パケツリレー型ネットワークと，階層構造ネットワークの組合せによって，伝送遅延の爆発を避けている．CarpetLAN のネットワーク構成を図 10 に示す．敷き詰められたカーペットは相互に接続され，メッシュ型のネットワークを構成する（以下，「基本レイヤ」と呼ぶ）．基本レイヤのネットワークのところどころには，上位レイヤへの接続ポートが設けられている．上位レイヤのノードは，複数の腕を持つツリー型のネットワークを構成しており，最上位のノードは部屋ごとに設けられた Room Gateway を通じて外部ネットワークに接続されている．

表 1 に，256×256（計 65,536 個）のカーペットを接続する場合の，基本レイヤのグルーピング個数と上位レイヤの階層数に応じた最大遅延（対角間での通信において，1 hop あたりの遅延を 1 ms と仮定），および必要とされる中継ノードの個数を示す．なお，本表では，各カーペットや中継ノードを正方形とし，東西南北の 4 ポートを持つと仮定している．本表によれば，基本レイヤを 8×8 程度でグルーピングし，階層構造を 6

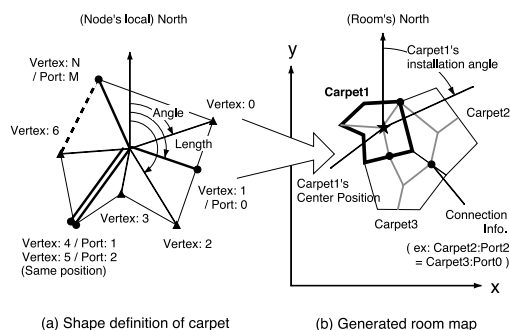


図 11 接続地図の生成．個々の形状と周囲との接続状態から部屋全体の構造を把握

Fig. 11 Map generation.

層とすることで，数万枚規模の床面ネットワークでも，伝送遅延を 26 msec 以下に抑えることが可能である．この値は，米国での公衆フレームリレー接続の伝送遅延（65 ms）よりも十分小さく，符号化やバッファリング等に要する遅延時間（それぞれ数十 ms）を含めても，ITU G.114 で示されているボイスアプリケーションのネットワーク遅延許容値（150 msec 以下）を満足できる．なお，カーペットの大きさを 100 cm×100 cm とした場合，256 m×256 m 程度の広さの空間に対応でき，大きなオフィスや倉庫，あるいはスタジアム等へも適用可能である．

3.2 自動構成

建物や部屋の形状は千差万別であり，単一形状のユニットだけですべてを敷き詰めることは困難である．CarpetLAN のネットワークでは，各カーペットが「自身の形状」を把握し，コンフィグレーション時に周囲との接続情報とともに上位レイヤに報告する．図 11 に，カーペットの形状定義と生成された接続地図の例を示す．現在のプロトコルでは，1 つのカーペットは，最大 254 個の頂点（凹凸のある形状も可）と接続点を持つことができるので，ほぼ自由形状の表現が可能である．Room Gateway は，部屋内のすべてのカーペットから報告された形状情報と，カーペットどうしの接続情報から，部屋全体の形状とネットワーク構成を把握できる．形状およびネットワーク構成の把握は，敷設時のほか，故障時や外部からのトリガによっても行われる．

Room Gateway に集積された全カーペットの形状

形状情報は，各カーペットに内蔵されたノード内の ROM（あるいは不揮発性 RAM）領域に書き込まれる．

初期化時にはパケツリレー型の伝送が用いられる．

接続点どうしが空間的に接していることを前提としているので，カーペットの形状とつながり具合によっては床面に隙間が生じることもある．

および接続情報から、部屋全体の空間構造と最適なネットワーク構造が計算される。まず、各カーペットごとに、最も近い上位レイヤへの結節点を求め¹、同じ結節点を持つカーペットどうしをグルーピングする。一方、上位レイヤどうしはツリー型ネットワークを構成しているので、ポートごとの接続構造が、そのままディレクトリ情報となる。

部屋全体の接続構造が決定されると、Room Gateway は、カーペットごとに以下の処理を行い、結果を各カーペットにダウンロードする²。

- そのカーペットが属する結節点への最短経路を求め「上位レイヤ向けパケットの出力ポート」を決定する。
- 同一グループ内のほかのカーペットへの最短経路を求め「同一グループ内の各カーペット向け出力ポート」を決定³する。

次に、各ノードのルーチング方法について述べる。各カーペットは、つねに自身の床上面に存在している床上機器や装着機器の識別情報（IP アドレスや MAC アドレス）を保持している。また、同一グループに属するほかのカーペットの床上面に存在している機器の情報も共有している。また、上位レイヤの各ノードには、自身の配下の各カーペット上に存在している機器の識別情報が集約されている。各カーペットは、自身の床上面からの（電界を用いた）パケットを受け取ると、パケットの宛先 IP アドレスから、以下のように配布先を決定する。

- 宛先機器が自身の上に存在する場合：何もしない（床上機器どうしが電界経由で直接通信可能⁴）。
- 宛先機器が自身の属するグループ内に存在する場合：事前に通知された「同一グループ内の各カーペット向け出力ポート」に向けてパケットを転送する。
- 宛先機器が自身の属するグループ内に存在しない場合：事前に通知された「上位レイヤ向け出力ポート」に向けてパケットを転送する。

一方、隣接するカーペットや上位レイヤからのパケットを受け取った場合は、以下のように動作する。

- 宛先機器が自身の上に存在する場合：床上面に向けて送信する。

- 宛先機器が自身の属するグループ内に存在する場合：事前に通知された「同一グループ内の各カーペット向け出力ポート」に向けてパケットを転送する。

- 宛先機器が自身の属するグループ内に存在しない場合：事前に通知された「上位レイヤ向け出力ポート」に向けてパケットを転送する。

また、上位レイヤの各ノードの転送動作は以下のようになる。

- 宛先機器が自身の配下に存在する場合：宛先機器の属する下部レイヤのポートに向けてパケットを転送する。
- 宛先機器が自身の配下に存在しない場合：上位レイヤのポートに向けてパケットを転送する。

これによって、宛先機器に向けて、最短のホップ数でパケットが転送される。宛先機器が部屋のどこにも存在していなかった場合には、パケットは最上位のノードに届けられ、Room Gateway を経由して外部（ほかの部屋やインターネット等）に転送される。

3.2.1 重複パケットの処理

カーペット LAN においては、複数のカーペットにまたがって通信が行われることがある。この場合、あるカーペットから発信されたパケットが、またがっている人体等を通じて、隣のカーペットに戻ってくることがあり、パケットのループや増殖が起こってしまう危険性がある。この問題を避けるために、カーペット床上面からの受信時に、パケットが床上の携帯機器からのものか、隣接するカーペットからのものかを MAC アドレスから判断し、携帯機器からのもののみを転送している。

パケットの重複は、ブロードキャストパケットでも起こりうる。ブロードキャストパケットを受信した場合は、受信したポート以外への転送を行うが、カーペットがメッシュ状に接続されているために、パケットのループが起きてしまう。これに対して、ネットワーク外部からのパケット受信時⁵にユニークなシーケンス番号を付与し、最近転送したパケットのシーケンス番号と比較することで、パケットのループを防いでいる。

3.2.2 ヘッダの書き換えによる透過処理

CarpetLAN 内でのパケットは、Ethernet ヘッダの先頭 12 Bytes（MAC アドレス格納分）を利用し、宛先のノードやシーケンス番号等の内部コントロール情報を埋め込んで転送処理を行っている。書き換えら

¹ 距離はホップ数、最短経路計算にはダイクストラ法を使用。

² このほか、各カーペットには、自身の位置情報や、自身が属するツリーの構造等がダウンロードされる。

³ グループ内のカーペットの個数分だけ繰り返す。

⁴ 床上機器どうしの通信を安定させるために、いったんカーペット側でホップさせる方法もある。

⁵ 各カーペットの床面からの受信時、および Room Gateway での外部からの受信時

れたこれらの情報は、最終的に携帯機器や外部ネットワークに向けて送出されるときに書き戻される。したがって、外部の機器から見て CarpetLAN ネットワーク自身は単なるリピータハブ（カーペット上を移動しても MAC アドレスが変わらない）として見え、携帯機器側に特別なプログラムを付加することなく、移動通信が行える。

3.3 位置検出

Room Gateway によって部屋全体の空間構造が収集されると、各カーペットの部屋内における相対位置が確定する。これに加え、1つのカーペットの絶対位置と方向、あるいは2つ以上のカーペットの絶対位置が与えられれば、すべてのカーペットの絶対位置が確定する¹。

一方、各カーペットは、つねに自身の床上面に存在している床上機器や装着機器の情報（IP アドレスおよび MAC アドレス）を保持している。カーペットと床上機器の対応は上位レイヤに順に伝達され、最終的に Room Gateway に集約される²。したがって、Room Gateway は、部屋内における床上機器の位置を、特別な位置測定用機器を付加することなく、カーペットサイズの精度で把握できる。ほかの床上機器や外部から、位置検索要求が送られてきた場合には、Room Gateway が保持している位置情報が返される。また、ターゲットとなる床上機器に対してパケット（ARP や PING 等）を送れば、ターゲットが存在するカーペットとの対応関係がアップデートされ、最新の位置情報を得ることができる。

なお、床上機器が複数のカーペットにまたがっている場合には、双方のカーペットの位置関係から、精度の高い位置情報を得られる。複数カーペットの重心位置計算のほか、床上機器のサイズ情報を用いたさらなる精度向上が可能である³。

3.4 移動位置予測によるルーチング

CarpetLAN は、移動通信システムの一つである。移動通信システムにおいては、移動する物体に追従して、パケットの配送先セルを変化させる必要がある。従来の移動通信システムでは、セルの大きさに対する物体の移動速度がさほど大きいというのに、セルどう

しが重なっているために、通信を行いながらセル移動（ハンドオーバー）を行うことは容易であった。しかし、隣接セルとのセパレーションが大きい CarpetLAN においては、高速で移動する物体に対して確実にパケットを配送することは難しい⁴。この場合、物体の移動が予想されるセル（群）に対してパケットを重複配送すれば、配送ミスを防ぐことができるが、ネットワークへの負荷を減らすためには、物体の移動予測を詳細に行う必要がある。CarpetLAN システムにおいては、「移動物体」は人間自身である。したがって、人間が可能な「移動（歩行や走行）」のパターンや限界値の把握は、予測性能の向上につながる。

3.4.1 人間の移動限界の測定

そこで、人間が行うことのできる加減速や方向変化の限界値を調べ、「移動範囲の限界」を求めるための実験を行った。6m×4m の運動空間に 50cm 間隔のメッシュを書き入れ、中心部分の直上（高さ 6m）に下向きに設置した DV カメラによって、移動する被験者の頭頂部に設置したマーカ（3.5cmφ）を撮影し、1/30 秒ごとのマーカ位置を算出した。なお、被験者は、成人男子 12 名であった。実験空間の様子を図 12(d) に示す。

最初に、ある速度で走行中の人間が可能な加速度の限界値を調べるために、急加速実験を行った。静止状態から可能な限りの急加速（試行回数計 21 回）を行い、1/30 秒ごとの位置⁵から得られた瞬時速度に対する瞬時加速度の関係を算出した。得られた結果を図 12(a) に示す。同図には参考値として、陸上選手が行った 100m 走の split time から求めた速度および加速度値（△）を記入している²²⁾。

次いで、ある速度で走行中の人間が可能な減速の限界値を調べるために、急減速実験を行った。8m/s から 2m/s まで様々な速度での歩行および走行状態で計測空間に進入し、直後に可能な限りの急減速を行った（試行回数計 59 回）。同様に 1/30 秒ごとの位置から得られた瞬時速度に対する瞬時加速度の関係を算出した。得られた結果を図 12(b) に示す。

また、ある速度で走行中の人間が可能な旋回角度の限界値を調べるために、急旋回実験を行った。10m/s から 2m/s まで様々な速度での歩行および走行状態で計測空間に進入し、直後に可能な限りの左急旋回を行った（試行回数計 50 回）。同様に 1/30 秒ごとの位

¹ 絶対位置としては緯度経度がある。このほかにも「X ビル Y 階 Z 部屋の入口」等、相対的な指定方法も考えられる。なお、現在は位置情報を手動で与えている。

² 各カーペットおよび Room Gateway での位置情報の管理にはハッシュテーブルを利用して、検索時間の短縮を図っている。

³ たとえば、大きさ 20cm の機器が隣接する 2 枚のカーペットに属していると報知された場合、境界線から 20cm 以内の位置に存在することが推定できる（未実装）。

⁴ たとえば、1 メータサイズのカーペット上を人間が走り抜ければ、1 秒間に 10 回以上のセル移動が起きる可能性がある。

⁵ 頭部の揺れ等の計測ノイズを抑えるため、9 点移動平均を用いている。

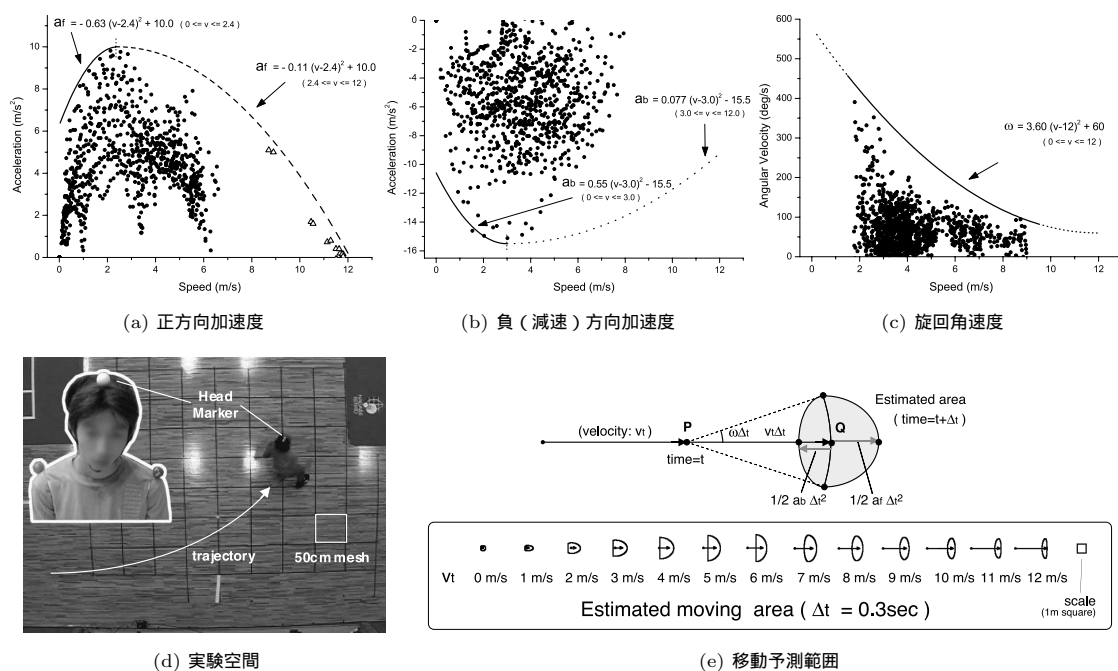


図 12 人間の移動限界(瞬時速度値に対する正負加速度および各速度限界値), および移動位置の予測
Fig. 12 Performance limits of humans (acceleration and angular velocity), and estimated area.

置から得られた瞬時速度に対する瞬時角速度の関係を算出した。得られた結果を図 12(c) に示す。

3.4.2 移動位置の予測

得られたグラフから, 瞬時速度に対する最大加速度, 最大減速度, および最大角速度を求め, 人間の移動限界とする。得られた近似式(2次)を図 12(a), (b), (c) に重ねて示す。これらの近似式を用いて, 速度 v_t で走行中の人間が, Δt 時間後に到達可能な空間の範囲と, 各速度における 1/3 秒後の予測範囲例を, 図 12(e) に示す。

3.4.3 パケット再配送手順

以下に, 予測関数を用いた床上機器へのパケット再配送手順を示す。

- 最も最近にターゲット(床上機器)が存在した CarpetLAN のノード(図 12(e) の P 点)に対してパケットが配送される。
- P 点のノードは, ターゲットの直前の移動速度(直前のパケットの送信時刻とターゲットの位置情報から計算)から, 移動予測範囲を算出する。
- P 点のノードは, 予測範囲の中心(図 12(e) の Q 点)のノードに向けて, 予測範囲の形状とともにパケットを転送する。

- Q 点のノードは, 受け取ったパケットを周囲のノードに向けて送出する。
- 周囲のノードは, 自身が予測範囲内に位置する場合, 受け取ったパケットを床面に送出するとともに, ほかのポートから周囲のセルに向けて送出する。
- すでに受け取ったパケットか, 自身が予測範囲内に位置しない場合, 受け取ったパケットを破棄する。

これによって, Q 点を中心に再配送パケットの flooding が行われ, 予測範囲を超えたところで消滅する。

4. 実験と議論

4.1 実験システムと評価

4.1.1 CarpetLAN ノード

CarpetLAN の各セル内に設置されるノード機器を図 13 に示す。各セルを正方形とし, 4 辺に周囲との接続点を持つ構造とした。各ノードは, 上記 4 方向の接続点に加え, 上位階層との接続用, 床上機器との接続用に合計 6 個のネットワークポート(10/100baseT Ethernet)を持つ。ノードは RISC CPU (VR5500) と 16 MB の ROM, 64 MB の RAM を持つ。OS には Linux-VR を使用した。なお, 最下層のノードと,

パケットの再配送時には最下層のメッシュ構造のみを用いている。

シーケンス番号で判断する。

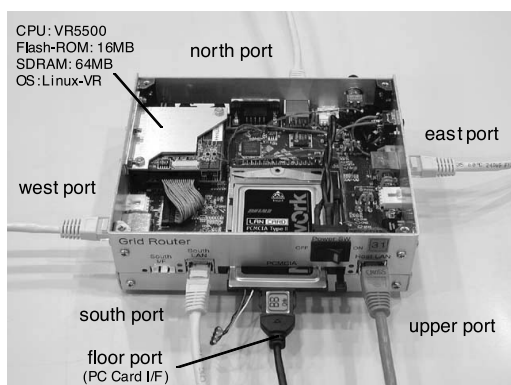


図 13 CarpetLAN ノード (Linux ベース, 6 ポート)

Fig. 13 CarpetLAN node.

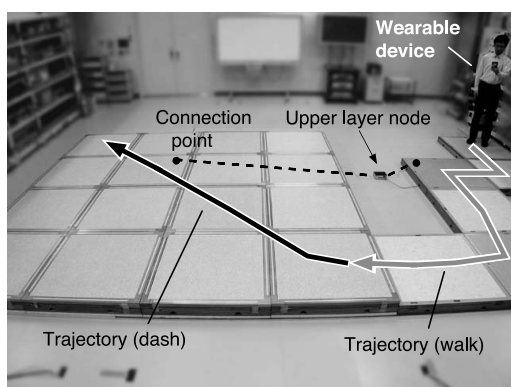


図 14 実験用ネットワーク (22 カーペットセル). PDA を所持しながら移動した

Fig. 14 Experimental network.

階層構造の中間ノードのハードウェアは同一で、立ち上がり時に周囲のノードとの接続関係によって、ネットワーク中の自身の役割を判断する。また、最上位の Room Gateway には、PC 互換機の Linux を使用した。

4.1.2 実験用ネットワーク

実験用ネットワークは図 14 のように 22 個の正方形セルから構成されている。隣り合うセルはすべてメッシュ状に接続されており、中間層は 1 層である。

4.1.3 ネットワークの自動構成

上記 22 台のカーペット群に対して Reset Command を発行後、約 6 秒で全カーペットの接続構造把握と、各カーペットへの経路情報ダウンロードが終了した。ネットワークの一部を切断したり、新たなノードを加えたりした場合、最大で 1 分後に接続情報に反映された¹。図 15 に把握された接続構造を示す。

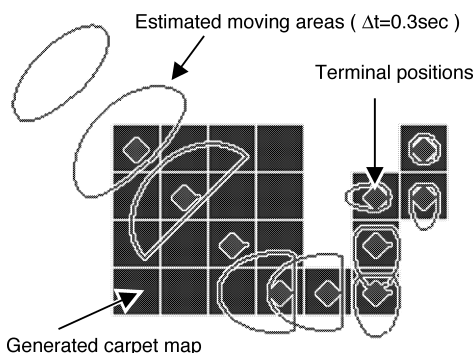


図 15 生成された地図と移動予測範囲 (検出された移動軌跡, および 0.3 秒後の移動予測範囲)

Fig. 15 Generated map and estimated areas.

4.1.4 位置登録とハンドオーバー

上記実験ネットワークにおいて、位置登録およびハンドオーバー処理のテストを行った。PDA²を携帯機器として用い、実験ネットワーク上の様々な位置において、携帯機器から Room Gateway に対して PING パケットを送信し、結果が返ってくるまでの時間を計測した。その結果、静止状態での応答時間が約 3–6 ms であるのに対し、移動直後には約 23–26 ms となり³、ハンドオーバー処理に要する時間は約 20 ms であった。また、中継ノード数と所要時間の関係から、ノード間のパケット転送に要する時間は、第 1 層・中間層ともに 1 hop あたり約 0.3 ms となり、当初想定した 1 ms を満たしていた。

4.1.5 移動予測と再配送

継続的に UDP パケット (64 bytes) を発信する携帯機器を手に持ったユーザが、図 14 の矢印のように移動した場合の位置登録軌跡と、対応する予測範囲 (0.3 秒後) を図 15 に示す。本図では、移動の初期においては歩行 (低速走行)、終盤においては加速走行を行っており、予測範囲の形状が変化している。

また、移動予測による下りパケット再配送の効果を調べるために、Room Gateway から継続的に発信された UDP パケット (64 bytes) を、移動する携帯機器側で受信した場合のエラー率を測定した。移動速度 1.6 m/s (歩行時) および 2.7 m/s (ジョギング程度の走行時) に対して、再配送の有無別に測定を行った。その結果、再配送を行わない場合のエラー率は、歩行時に 53%, 走行時に 67% であり、静止時⁴の 3% に比べて大きく増加しており、追従洩れが生じている。

² iPaq

³ 携帯機器と Room Gateway 間の中継ノード数によって異なる。本実験においては予測制御による再配送は行っていない。

⁴ 図 8 の floor → wearable の項参照。

¹ 監視間隔を 1 分に設定している。

これに対し、移動予測による再配送を行った場合には、歩行時に 12%、走行時に 22% であり、追従洩れが改善された。

4.2 考察

以下に、現在のシステムでの問題点と解決策の一例を示す。

4.2.1 隣接した身体による干渉

CarpetLAN においては、複数の人間が近接して存在した場合に、人物間での干渉が起きる可能性がある。干渉の程度を把握するために行ったシミュレーションを図 5 に示す。高さ 180 cm、幅と奥行きがともに 30 cm の人体を、1 m 角のカーペット中央に配置した。カーペットの配置を 3 × 5 に拡張したほかは、以前のシミュレーションと同じ条件である。図 5 (e2) は、中央の行、左から 2 番目の床下極板に 3 V の電圧を印加した状態を、中央の人体を切断する垂直面 ($y = 0$) で示している。表示条件は以前のカーペット側送信と同一 (-40 dB スケール) である。

これによれば、発生した電界が隣接する人体の側面に到達しており、誘起される電界は -21 dB 程度になる。これは正規の通信による電界 (-19 dB) とほぼ同じであり、通信の干渉が起きている。一方、反対側の人体側面への回り込みは少なく (-37 dB)、干渉は隣接セル止まりである。

次いで、人物が手をつないだ状態を模したシミュレーションを行った。腕を太さ 10 cm の角柱と見なし、床面から 145 cm の高さで、隣接する人体と結合させた (図 5 (f1) 参照)。印加および表示条件は前回と同じである。図 5 (f2) に示すように、2 つ隣の人体まで干渉範囲が広がっている。

以上のように、CarpetLAN の有効セルサイズは、混雑した空間では、直径 5 m 程度にまで増加し、スループットと位置検出精度の低下が発生する。スループットの低下は、無線通信で広く用いられている符号変調や周波数変調等の手段を用いてセル分離を行えば解決できるが、トランシーバの構造とハンドオーバー処理の複雑化が課題となる。

4.2.2 位置情報の把握

現在の実装では、携帯機器の位置識別は、携帯機器から送信されたパケットの有無によって行っている。そのため、携帯機器からのパケット発信が行われない

限り、位置情報の更新が行われない。携帯機器に向けて定期的に ARP パケットを送出し、携帯機器からの返答を求めることはできるが、ネットワークの負荷増を招いてしまう。携帯機器側が定期的に「空パケット」を送出する方法は、携帯機器側にドライバを入れる等の対応が必要となる。

また、携帯機器の床面からの離脱はタイムアウト (現状 1 秒) によって行っており、離脱状態の即時把握が難しい。タイムアウトを短くすれば、誤検出時間を短縮できるが、携帯機器からのパケット発信間隔が短い場合に、「切断」と誤判断される危険性が増加する。

4.2.3 カーペットまたがり時の重複パケット処理

CarpetLAN においては、人間は 1 本のネットワークケーブルと等しい。したがって、複数のカーペットにまたがった場合には、外部からのパケットが、携帯機器に 2 重に到達する。同様に、携帯機器からのパケットも、複製されて外部に転送される。TCP では端末側でシーケンス番号を管理しており、重複パケットは読み捨てられるが、UDP を用いた TV 電話や IP 電話等では不具合が生じる。ネットワーク側でパケットの中身を比較し、重複パケットの除去を行う手法も考えられるが、処理コストの増大が課題である。

4.2.4 トラフィック制御

現状のルーチング方法では、最下位レイヤの転送には「最短距離」のみを用いているが、この手法では、特定のカーペット (グループの端辺等) にトラフィックの集中が起きる可能性がある。たとえば、ダイクストラ法での最短距離判定の際に、探索順を換えるか、同一距離の場合にはランダムに割り当てる等の手法が考えられる。本質的には、各ノードでのトラフィック状況を監視し、混雑時には迂回する等の手法が必要である。

4.2.5 故障把握

現在の実装では、各ノードは 1 分間隔で周囲のノードとの接続状況を確認しており、変化が起きた場合には、上位層に通知を行っている。Room Gateway は、変化の起こったノード群に対して経路情報の再計算とダウンロードを行う。これによって、特定のノードが故障した場合でも、通信を継続することができる。現状では、経路の再構築が行われるまでに 1 分程度の不通時間が発生するが、接続確認の間隔を短くすることで短縮が可能である。また、中間層のノードに対しては、故障時の影響が大きいため、ノード機器や中

この場合でも、静止時 (3%) に対してエラー率が増加しているが、静止時に比べて足の設置状態が悪化することと、走行時には両足が床面から離れるために、通信ができない時間が生じるためだと考えられる。
カラー印刷の関係で前方ページに配置。

特定、あるいはすべての携帯機器に対して ARP パケットを送信し、位置情報をアップデートする「位置報知」コマンドは実装されている。

間層自身の2重化が必要だと考えられる。

4.2.6 スケーラビリティ

CarpetLANでは、階層化構造を用いることで、数万個規模のセルに対しても、ネットワーク遅延を数十ms程度に抑えることができる。しかしながら、数千個の移動物体が頻繁に床上を動き回るような場合には、物体の位置把握とルーチング処理のためのパケットが増大してしまう。現在のシステムでは、これらのパケットは物体がカーペット間を移動するごとに再上位のRoom Gatewayにまで配送されており、効率的ではない。中間ノードにこれらの処理を分散し、階層化を行うことで、上位レイヤへのパケット配送を抑制できる。

4.2.7 タイミング同期

現状の実装では、携帯機器の速度判定に「以前の通信時刻」を用いているが、各ノード間でのクロック同期が不完全であるため、誤差が生じている。NTP等のタイミング情報をネットワーク側に流すことで、クロック同期を行う手法は、ノード数が数万個になると数10msecの遅延時間が生じ、厳密性に欠ける。たとえば、各ノードへの電源ラインに時刻情報を重畳し、ネットワーク全体が1つの基準クロックで動くようにする等の手法が考えられる。

4.2.8 敷設の容易さ

現在のシステムでは、電源やネットワークの線は既存のコネクタを用いているため、カーペットの個数が増えた場合に敷設作業が煩雑になる。電源やネットワーク等、各種信号線を一体型のコネクタにして、隣のカーペットと容易に「スナップイン」できるようにすることが望ましい。水の侵入によるショートを避けるためには、電磁結合による無接点型コネクタが理想的である。

4.2.9 速度向上

ノード間のバックボーンは、現状10/100Base-T Ethernetを用いているが、この部分の高速化は容易である。一方、携帯機器との電界通信は、人間や床面等を伝送媒体として用いており、現状(10BaseT)より大幅な速度向上は難しいと思われる。

5. むすび

本論文では、人体や床面を伝送路として利用する屋内向け無配線ネットワークシステムについて、その基本的な構成を述べた。初めに、シミュレーションによって、人体や床面近傍の電界分布を明らかにするとともに、EO電界センサを用いたトランシーバを用いて、10Mbpsでの通信を確認した。また、敷き詰め型に適

した簡便なネットワーク構成について述べ、人間を移動体とする場合の追従動作に不可欠な、人間の運動能力の限界値を実験によって明らかにした。

本システムは、家庭やオフィスのほか、乗り物(電車や飛行機の床面に設置)、あるいは多数のユーザが同時に使用するイベント会場等での、ユビキタス環境の実現に有効であると考えられる。

今後は、人体通信により適した変調方式を検討するとともに、通信路としての基本的な性能を明らかにしたい。ネットワーク構造やルーチングについても、より適した実装方法の検討とともに、定量的な評価を行っていきたい。各種機器の小型化とともに、有効なアプリケーションの提案も不可欠である。部屋の畳やタイルカーペットにノードLSIが組み込まれ、すべての床面をnetwork reachableとすることが最終目標である。畳の裏は世界につながっているのだ。

参考文献

- 1) Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. IEEE Infocom 2000*, Vol.2, pp.775-784 (2000).
- 2) Harter, A., Hopper, A., Steggles, P., Ward, A. and Webster, P.: The Anatomy of a Context-Aware Application, *Proc. ACM MOBICOM'99*, pp.59-68 (1999).
- 3) Want, R., Hopper, A., Falcao, V. and Gibbons, J.: The Active Badge Location System, *ACM Trans. Information Systems*, Vol.10, pp.91-102 (1992).
- 4) Rekimoto, J.: SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces, *Proc. ACM CHI 2002*, pp.113-120 (2002).
- 5) Dietz, P. and Leigh, D.: DiamondTouch: A Multi-user Touch Technology, *Proc. ACM UIST 2001*, pp.219-226 (2001).
- 6) Schmidt, A., Strohbach, M., Laerhoven, K.V., Friday, A. and Gellersen, H.W.: Context Acquisition based on Load Sensing, *Proc. Ubicomp 2002*, pp.333-351 (2002).
- 7) Addlesee, M.D., Jones, A., Livesey, F. and Samaria, F.: ORL Active Floor, *IEEE Personal Communications*, Vol.4, No.5, pp.35-41 (1997).
- 8) Paradiso, J., Abler, C., Hsiao, K. and Reynolds, M.: The Magic Carpet: Physical Sensing for Immersive Environments., *Late-Breaking/Short Demonstrations of CHI'97*, pp.277-278 (1997).
- 9) McElligott, L., Dillon, M., Leydon, K., Richardson, B., Fernstrom, M. and Paradiso,

- J.: 'ForSe FIElds' — Force Sensors for Interactive Environments, *Proc. UbiComp 2002*, pp.168–175 (2002).
- 10) Gorbet, M.G., Orth, M. and Ishii, H.: Triangles: Tangible Interface for Manipulation and Exploration of Digital Information Topography, *Proc. ACM CHI '98*, pp.49–56 (1998).
 - 11) Minami, M., Nishizawa, Y., Hirasawa, K., Morikawa, H. and Aoyama, T.: MAGIC-Surfaces: Magnetically Interfaced Surfaces for Smart Space Applications, *Adjunct Proc. Pervasive 2005*, pp.59–64 (2005).
 - 12) Zimmerman, T.G.: Personal Area Networks: Near-field Intrabody Communication, *IBM Systems Journal*, Vol.35, Nos. 3&4, pp.609–617 (1996).
 - 13) 福本雅朗, 外村佳伸: Wireless FingerRing: 人体を信号経路に用いた常装着型キーボード, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.5, pp.1423–1430 (1998).
 - 14) Matsushita, N., Tajima, S., Ayatsuka, Y. and Rekimoto, J.: Wearable Key: Device for Personalizing Nearby Environment, *Proc. IEEE ISWC'00*, pp.119–126 (2000).
 - 15) 土井謙之, 小山正樹, 鈴木佳子, 西村篤久: 人体を伝送線とする通信モジュールの開発, HI シンポジウム 2001 論文集, pp.389–392 (2001).
 - 16) Partridge, K., Dahlquist, B., Veisheh, A., Cain, A., Foreman, A. and Goldberg, J.: Empirical Measurements of Intrabody Communication Performance under Varied Physical Configurations, *Proc. ACM UIST 2001*, pp.183–190 (2001).
 - 17) Shinagawa, M., Fukumoto, M., Ochiai, K. and Kyuragi, H.: A Near-Field-Sensing Transceiver for Intrabody Communication Based on the Electrooptic Effect, *Trans. IEEE Inst. and Meas.*, Vol.53, No.6, pp.1533–1538 (2004).
 - 18) Fukumoto, M., Shinagawa, M., Ochiai, K. and Sugimura, T.: ElectAura-Net, *Emerging Technologies, ACM Siggraph 2003* (2003).
 - 19) Fujii, K., Ito, K. and Tajima, S.: A study on the receiving signal level in relation with the location of electrodes for wearable devices using human body as a transmission channel, *Proc. IEEE Antennas and Propagation Society Int'l Sympo. 2003*, Vol.3, pp.1071–1074 (2003).
 - 20) Fukumoto, M., Shinagawa, M. and Sugimura, T.: A Broadband Intrabody Communication System with Electro-Optic Probe, *Proc. IAD (1st Int'l Conf. of Appliance Design)* (2003).
 - 21) 笹瀬 巖 (監修): 次世代デジタル変復調技術, トリケップス (1996).
 - 22) Mureika, J.R.: Donovan Bailey's Split Time at 1997 World Championships, Athens GRE. <http://myweb.lmu.edu/jmureika/track/splits/splits.html#87wc>

(平成 17 年 9 月 29 日受付)

(平成 18 年 5 月 9 日採録)



福本 雅朗 (正会員)

NTT ドコモマルチメディア研究所主幹研究員。1964年生まれ。1988年電気通信大学応用電子工学科卒業。1990年同大学院修士(電子)課程修了。同年日本電信電話(株)入社。以来,各種インタフェースデバイスの研究に従事。NTT ヒューマンインタフェース研究所を経て,現在,NTT ドコモマルチメディア研究所。工学博士。電子情報通信学会,ヒューマンインタフェース学会,ACM 各会員。



品川 満

NTT マイクロシステムインテグレーション研究所主幹研究員。1960年生まれ。1983年東北大学工学部電子工学科卒業。1985年同大学院修士(電子工学)課程修了。同年日本電信電話(株)入社。以来,超高速電気信号計測技術の研究に従事。現在,NTT マイクロシステムインテグレーション研究所。工学博士。電子情報通信学会,IEEE 各会員。