

介護用移動ロボットののための無線伝送方式

山田 松一 東京工科大学工学部情報通信工学科教授

1 まえがき

高齢化社会を迎え、介護を必要とする人は増大の一途をたどっている。この今日の状況において、人間による介護には要員、費用の面から限界があり、ロボットによる介護支援が必須になるものと考えられる。そのための支援ロボットの役割としては、介護を必要とする人の状態モニタ - ならびに行動補助などが重要で、病院・福祉施設・家庭などの屋内を移動するロボットと人間（要介護者あるいは介護者）の間で、上記の監視・制御のための情報を伝達し合う必要がある。

ロボットについてはこれまで多くの研究がなされており、人間に近い動きをするロボットも開発されつつあるが、そのための監視・制御は通常有線が使用されており、厳しい屋内電磁環境下での無線による監視・制御についての検討は充分ではない。さらに、ロボットの応答特性に及ぼす無線による入出力情報との相互作用については、今後の新しい研究が期待されるところである。報告者は現在無線LANの研究を進めており、複雑な伝搬環境を有する屋内無線の回線設計モデル構築のため、建物の構造・材質・室内構成・人の移動等を考慮して、それぞれ条件の異なる環境下での系統的な実験を行い、伝送品質劣化に関する統計的特性の解明を進めつつある⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。これらの成果を本研究に反映し、周囲構造物による電波の反射、遮蔽等の存在する厳しい屋内電磁環境条件下に置かれた移動ロボットを対象とし、監視・制御に必要な高速大容量の情報伝送に伴う問題点を解明しようとするものである。閉空間での電磁波伝送特性については、トンネル内での伝搬研究がかなり古くから行われており、また最近では屋内無線LANの導入をタ - ゲットにして、オフィスル - ム・廊下等での伝送実験、レイトレ - シングによる理論解析が盛んに行われているが、一般家庭を対象とした検討は少ない。特に、高齢者や身障者のように、比較的床から低い位置で行動する場合には介護用ロボットとの無線伝送も什器等の障害物による影響が大きくなるが、そのような状態における検討は殆どなされていない。

そこで本研究では、まず研究室で所有する小型無線ロボットの制御動作に関する知見を得るため、計算機ソフトウェアによる制御情報の伝達、動作の確認等に関する基礎的な実験を行った。つぎに、室内でロボットを使用する場合に最も影響が大きいと考えらる人の存在がロボット無線伝送に及ぼす影響について実験ならびに考察を進め、その基本的伝送モデルを考案した。さらに、音声やデ - タのみならず画像のような広帯域信号伝送を行う場合に問題となる多重波環境下での遅延歪み特性に関する実験を行ってその基礎的特性を明らかにした。本報告は得られた研究成果の報告である。

2 ロボットの制御動作に関する実験的検討

研究室で所有するRug Warrior はシングルボ - ド・ロボットを目標に構成されている小型ロボットで、マイクロプロセッサ（Motorola 社製 MC68HC11A8：タイマカウンタおよびADコンバ - タ内蔵）、センサ、アクチュエ - タ、モ - タなどが搭載されている。2つの駆動車輪があり、定点で回転して方向転換できるほか、3点支持のキャスタ - も備えている。なお、走行は対話型C（インタラクティブC）によるソフトウェア制御により行う。

図1は実験システムの構成を示すもので、次の順序で実験を行った。

- Step1：Interactive C を用いてロボット - ホスト間の送受信プログラムを作成する。
- Step2：Turbo C++ を用いてホスト - ロボット間の送受信プログラムを作成する。
- Step3：プログラムを実行してロボットの動作を確認する。

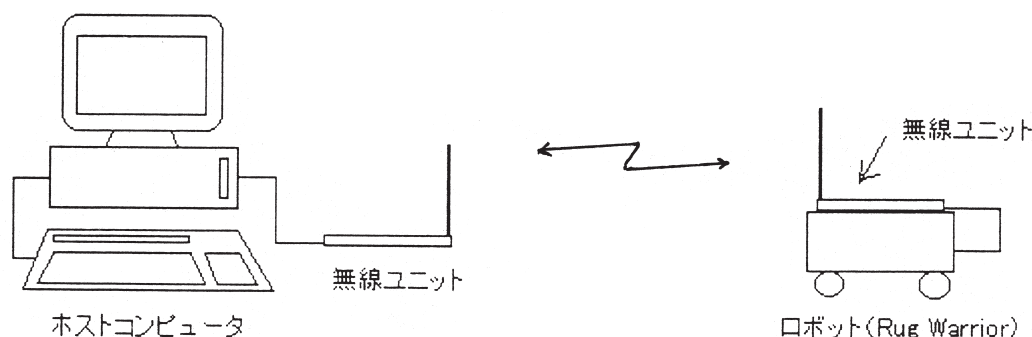


図1 無線ロボットのシステム構成

センサとしては、ロボットの周りに取付けられた3つのバンパ・センサにより、ロボットが障害物に衝突したことを検知する。また、その他の非接触型センサとして、近赤外線近接センサ、フォトセル、マイクロフォンが装備されている。

文献[4]に示した試作プログラムを用いてRug Warriorを動かし、センサの感度や無線による制御の応答性等を調べた。その結果、特に非接触型センサによる障害物の検出はかなり精度が甘く、プログラム上のなんらかの工夫が必要であること、ならびに無線による情報の送受信には時間ずれがかなり有り、複雑な制御の実時間処理には多くの制限（データの表示漏れや不処理データの存在等）の伴うことが明かとなった。大容量のデータ処理を行う場合、ロボット搭載のマイクロプロセッサでは負担が重く、処理が高速化できないことから、ホストコンピュータ側で受け持つなど、プログラム作成上十分な検討が必要であることも明かとなった。

3 屋内の無線伝送特性

屋内移動通信あるいは無線LANでは部屋単位のパコセルラ・システムを構築することになるので、その伝搬環境は直接波が中心でそれに部屋壁・机その他什器類からの散乱波が重畳されている状態と考えることができる。それに、携帯機の場合には柱とか什器による shadowing、あるいは卓上機の場合には人の移動による shadowing 等が加わることになる。このように屋内伝搬は建物の構造や使われている材料などによって複雑に変化するため、屋外伝搬に比べて統計的な取り扱いがむずかしい。従って個々の状態については、電磁界理論あるいは幾何光学的な解析が有用な場合も多いが、回線設計に必要な一般的な答えを得ることは現実問題としてかなり困難である。そこでここでは、実際に室内で各種実験を行って、信号強度変動特性ならびに位相遅延特性を明らかにした。

3.1 信号強度変動

報告者は無線LANについて、これまで室内での信号強度変動を調べる実験をいろいろ行ってきたり、その結果送受信アンテナ間を結ぶ line-of-sight に人が近づいたり、横切ったりしたとき、受信レベルが最も激しく変動し、大きな減衰量の生じることを確認している⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。そこでまず、人体による直接波のブロッキング（静的遮蔽）のみの影響を調べるため、周囲の壁からの反射の無い電波暗室内で静的遮蔽の定量的測定を行なった。図2は測定方法を示すもので、対向する送受信アンテナ（反射板付 1/4 波長モノポールアンテナ）間を人間がゆっくりと直角に横切るときの電界パターンを求めた。図3はその測定結果を示すもので、図3(a)は人体胴体部（h=106cm）が line-of-sight を横切るとき、また図3(b)は人体頭部（h=152cm）が line-of-sight を横切るときのものである。それぞれの図中の3本のカーブはアンテナと人体間の距離 d を 110cm、220cm、330cm と変化して求めた結果を示す。また、図3(a)中の黒丸はFD-TD法を用いて求めた計算値である⁽⁵⁾。なお、計算にあたっては、図4に示すような2次元空間を考えた。解析モデルとしては、長軸 50 cm、短軸 16 cm の楕円柱を用いて、筋肉の 2/3 の値を持つファントムモデルを考え、諸定数を誘電率 $\epsilon_r = 38$ 、導電率 $\sigma = 0.787$ とした。解析においては、FT-TD法を用い、以下の方程式を使って2次元 TE 波問題として求めた。このとき、格子寸法は $x = y = 0.4$ cm、格子数は $i \times j = 800 \times 600$ とした。

$$\frac{\delta H_x}{\delta t} = -\frac{1}{\mu} \frac{\delta E_z}{\delta y} \quad (1)$$

$$\frac{\delta H_y}{\delta t} = \frac{1}{\mu} \frac{\delta E_z}{\delta x} \quad (2)$$

$$\frac{\delta E_z}{\delta t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\delta H_y}{\delta x} - \frac{\delta H_x}{\delta y} \right) \quad (3)$$

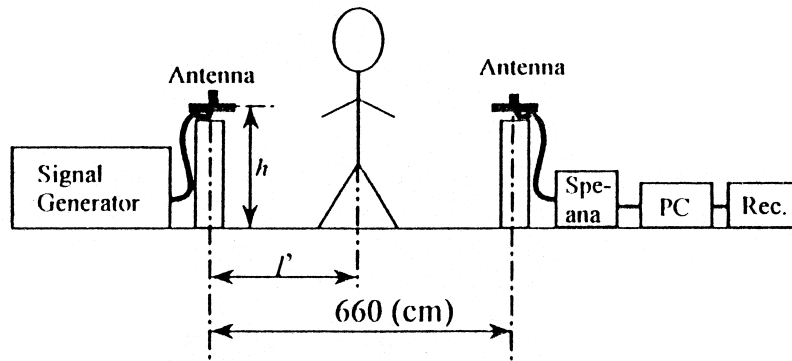
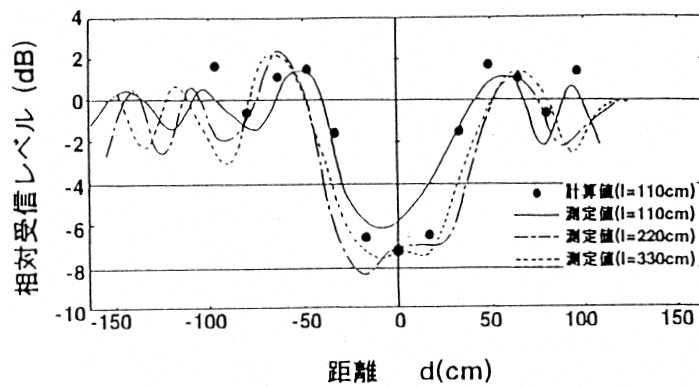
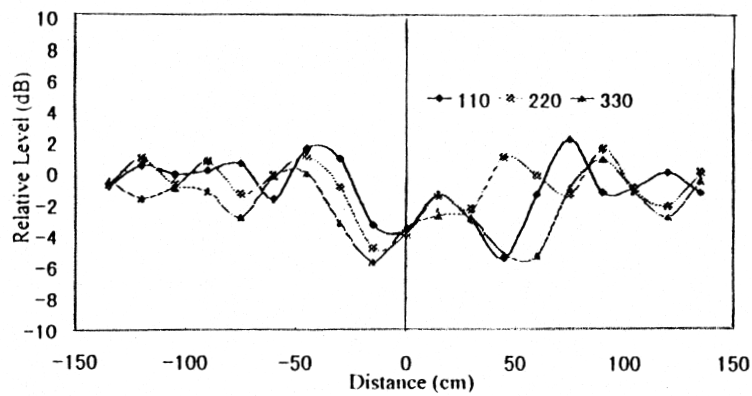


図2 人体による静的遮蔽の測定方法



(a) 人体胴体部が *line-of-sight* を横切る場合 ($h=106\text{cm}$)



(b) 人体頭部が *line-of-sight* を横切る場合 ($h=152\text{cm}$)

図3 人体による静的遮蔽の測定結果と計算値の比較 (周波数: 1.3GHz)

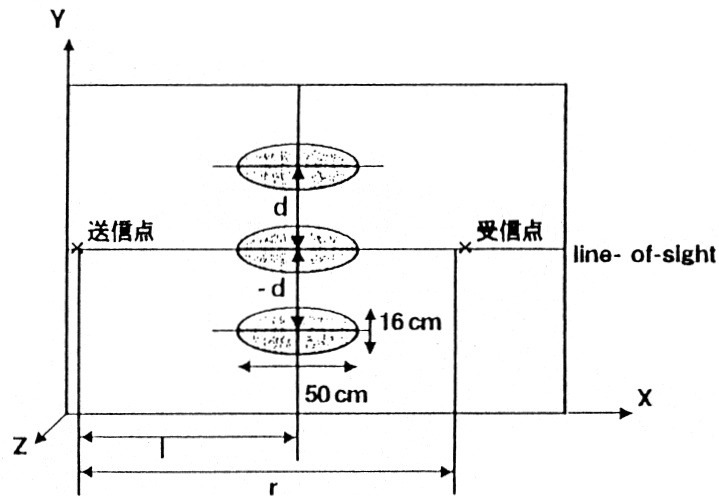


図4 解析モデル

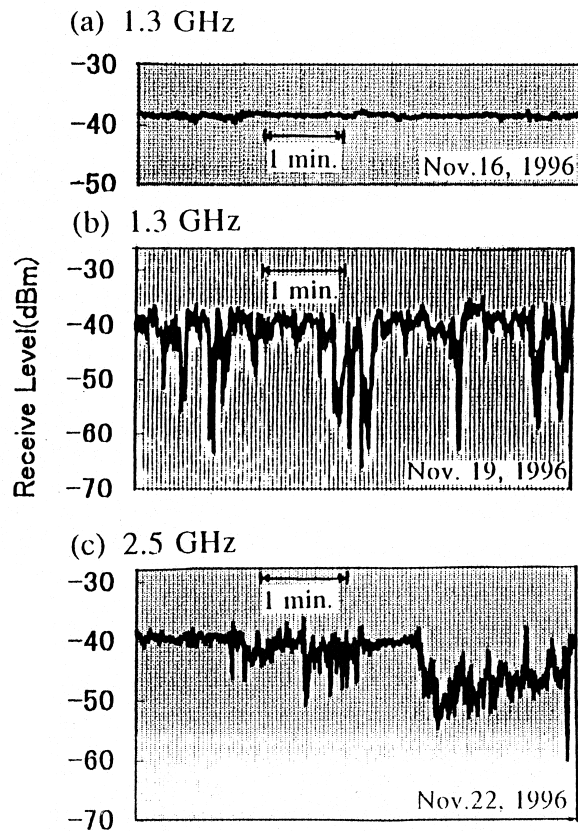


図5 信号強度変動の測定例

- (a) 静穏時 (1.3GHz)
- (b) 変動時 (1.3GHz)
- (c) 変動時 (2.5GHz)

これらの実験および計算結果から、人体による静的遮蔽の大きさは高々10dB程度であることが分かる。

つぎに、図5は実際に人が働く事務室環境科で得られた信号強度変動の測定例である。最も変動の大きい場合は信号レベルが30 dB以上も劣化していることが分かる。これらの事実を参考にして、屋内での電磁波環境を考察すると、本実験で用いたような水平面無指向性アンテナを送受信に使用して小型ロボットと通信を行なう場合、受信電界強度は送信アンテナから受信アンテナに到来する直接波が主であるのは言うまでもないが、その他、周囲の壁、天井、柱、机等の什器からの反射波が多数到来する多重波の合成となっており、信号強度の変動は室内を移動したり、手足を動かしたりする、いわ

ゆる人体の動きに伴って直接波や反射波が遮蔽あるいは回折されたりして、合成受信電界が時々刻々変化する状態と考えられる。人の動きが直接波のごく近傍あるいは直接波そのものに影響を及ぼさず、反射波にのみ影響を与えることによって合成される受信電界の変動は数 dB程度と比較的小さく、変動の確率密度分布(PDF)はほぼ正規分布で与えられる⁽⁶⁾。一方、人体によって直接波が遮蔽される状態では、その遮蔽の程度によって直接波のレベルは最大10dB程度下がり、それが直接波以外の多重波レベルと同程度になると、その位相関係次第で電界は互いに打ち消され、受信電界の合成レベルは定常値より30dB以上も劣化することになる。この場合、そのPDFはワイブルあるいはK分布に比較的良く合っている⁽⁶⁾。

3.2 位相遅延

屋内での多重波伝搬環境は、信号強度の変動をもたらすと同時に、帯域内の振幅歪みを生じ、高速データや画像通信等の広帯域伝送を妨げるものとなる。そこで、特に後者の帯域内振幅歪みに着目し、UHF帯の430, 1300, 2500 MHz の3周波数で、水平面内無指向性アンテナを用いて室内での多重波伝搬遅延特性に関する実験を行った。実験では、まず壁等からの反射のない電波暗室で、使用送受信アンテナの伝送帯域特性を調べ、次に大学の研究室内に送信アンテナを固定し、受信アンテナを室内のいろいろな場所に移動して伝送帯域特性およびそれから得られる遅延特性を求めた⁽⁷⁾。

図6は実験システムの構成を示すもので、送受信とも430 MHz帯ではモノポールアンテナ、1.3 および 2.5 GHz帯では反射板付き1/4 波長モノポールアンテナを使用した。偏波は垂直で、水平面内無指向性となっている。ネットワークアナライザ（以降、NAと呼ぶ）と送受信アンテナはあらかじめ帯域特性の校正された同軸ケーブルで接続されており、NAの出力をPCに入力してデータ取得した。周波数ドメインから時間ドメインを導出するにあたっては、NAのデータサンプリング数が最大 1601 個であることから、それをスプライン変換によって $2^{11} = 2048$ 個のデータに作り替え、逆高速フーリエ変換 (IFFT) して求めた。また一般に、離散フーリエ変換を行う場合、時間分解能(ΔT)は、 $\Delta T = 1 / F$ で表され、 F が大きいほど分解能が向上するが、ここではアンテナ自体の帯域特性を考慮し、周波数 430 MHz 帯では $F = 50$ MHz、周波数 1.3 および 2.5 GHz 帯では $F = 100$ MHzとした。実際の測定では、研究室（広さ：7.2m x 11.8m、高さ：2.85m）内で送信アンテナを図7に示す位置に固定し（高さ：床面上 2.5 m）、受信アンテナ（高さ：床面上 1 m）は可動台に載せて図中の各点（Point 1～ 12）を移動した。研究室内のロッカ - や実験台、机の配置は図7のようになっているが、実験台や机の上には測定器やPCが数多く置かれ、そのほか種々の什器が配置されている。なお、通常、室内では数人の人間が仕事をしているが、送受信間を人間が直接さえずることのない状態で測定した。図8は研究室内(Point 04)での遅延特性測定結果を電波暗室内でのそれと比較したものである。（時間 $T = 0$ 近辺の大きなピークは直接波の到来を示す。）同図から、研究室内では電波暗室と違って、周囲の構成物の反射等の影響により多くの多重波が到来するため、伝送帯域特性が劣化し、多重波遅延が大幅に増えていることが分かる。また図9は、測定 Point の送受信アンテナ間距離(D)に対する直接到来波を除いた多重遅延波のみの平均 μ および標準偏差（Delay Spread）を表したものである。測定場所の周囲環境によってばらつきはあるものの、概ね距離 D が短いほど、送信アンテナから受信アンテナに到来する直接波に比べて、多重反射波の遅れが増加するため、 μ および σ が大きくなる傾向が認められる。

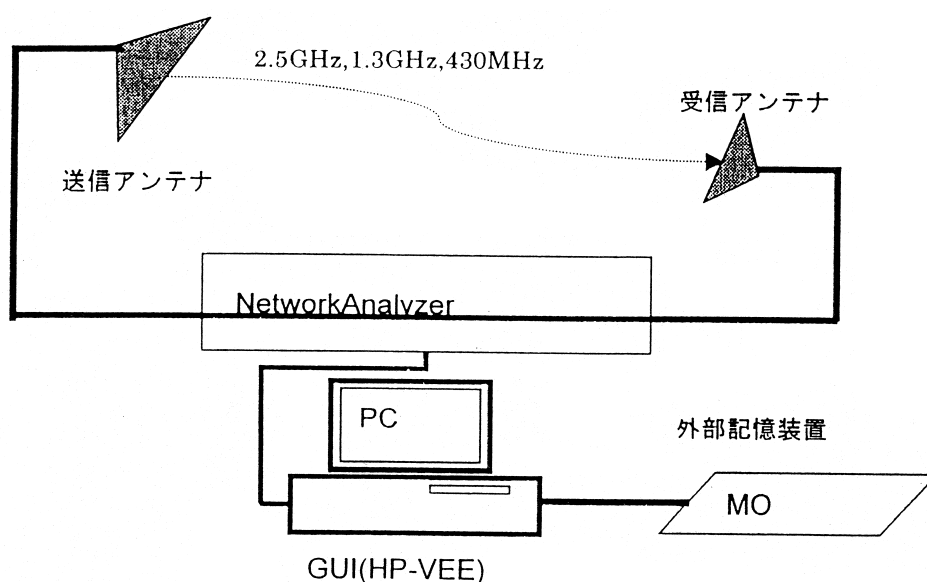


図6 遅延特性測定システム

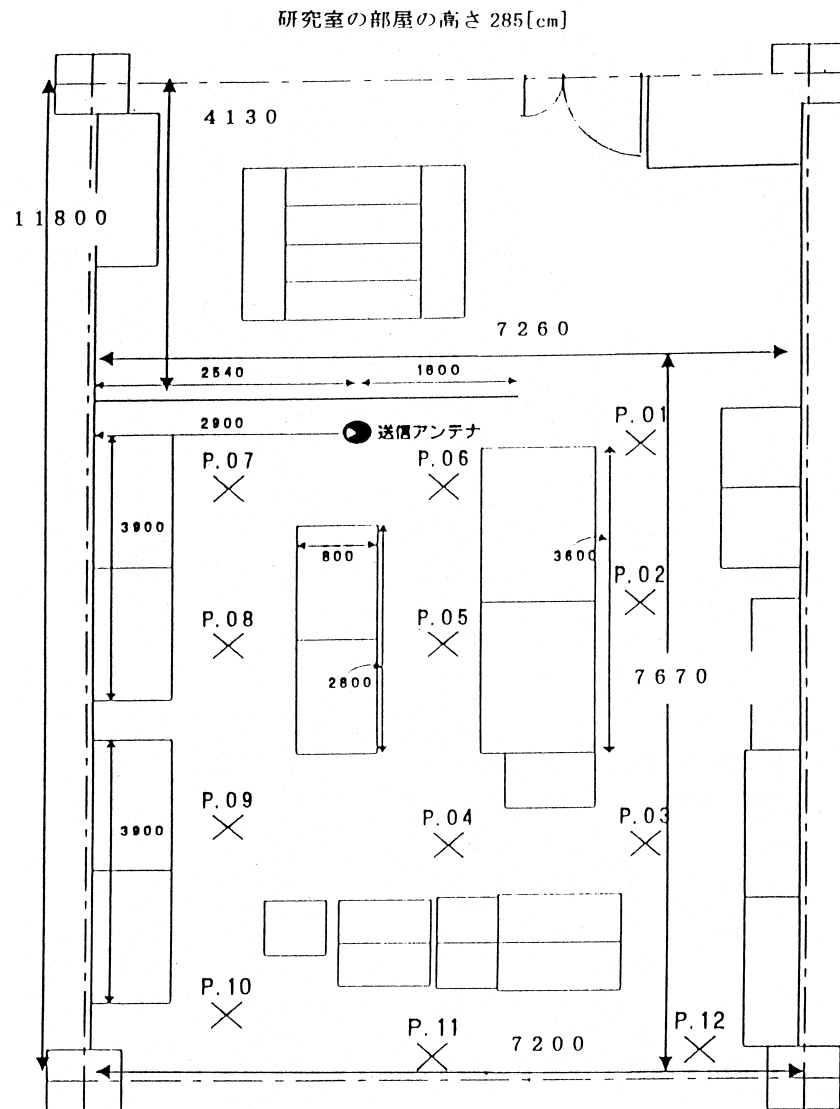
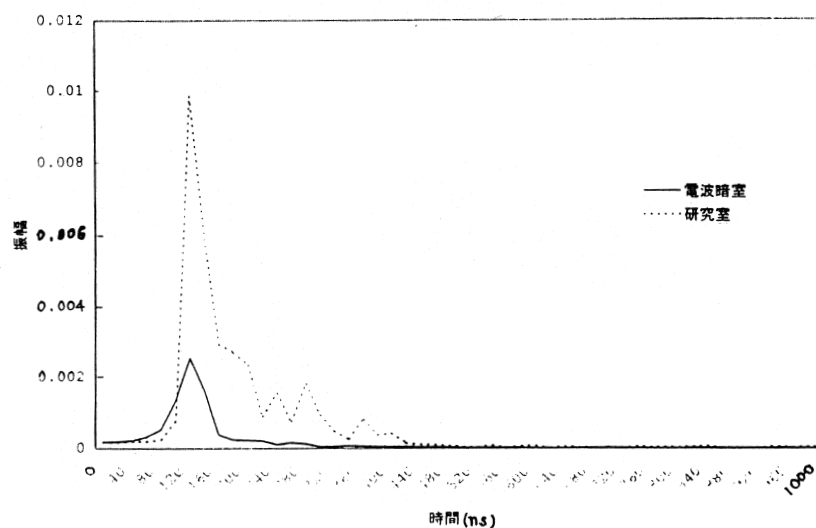
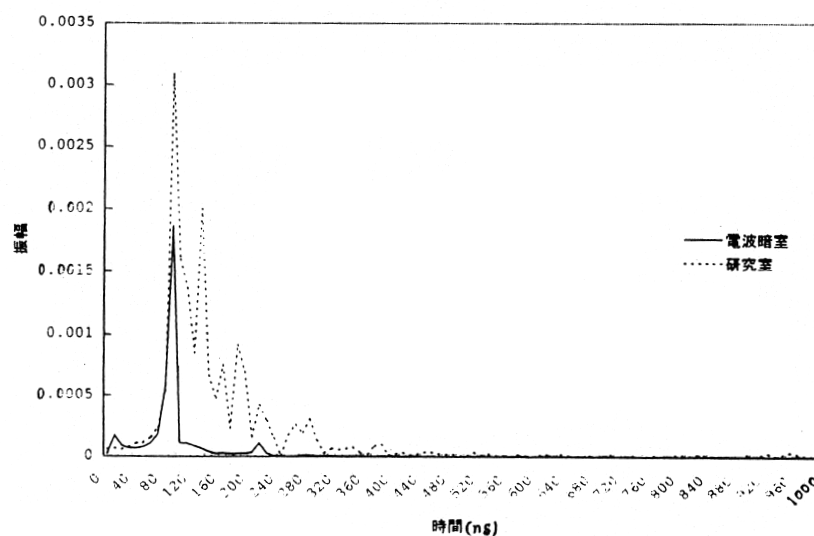


図7 研究室内見取り図および測定ポイント1～12



(2) 1.3 GHz

1.3GHz SPAN 100MHz 遅延特性比較結果



(3) 2.5 GHz

2.5GHz SPAN 100MHz 遅延特性比較結果

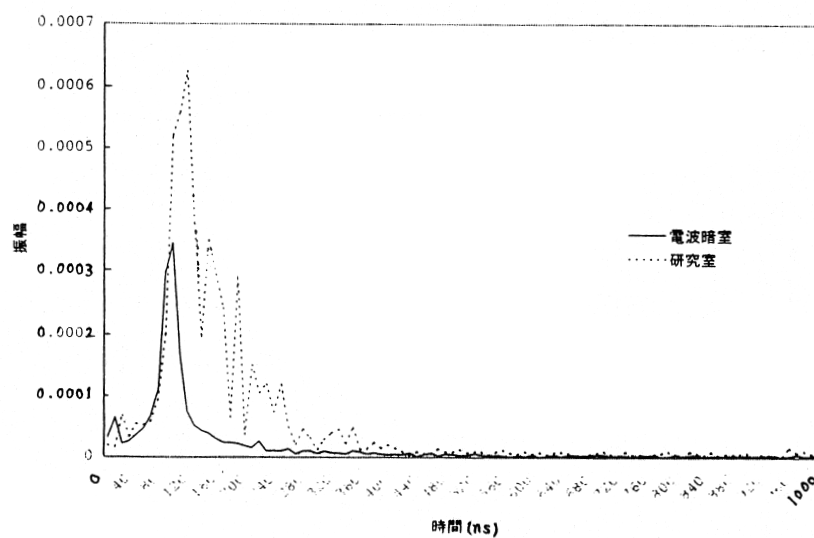
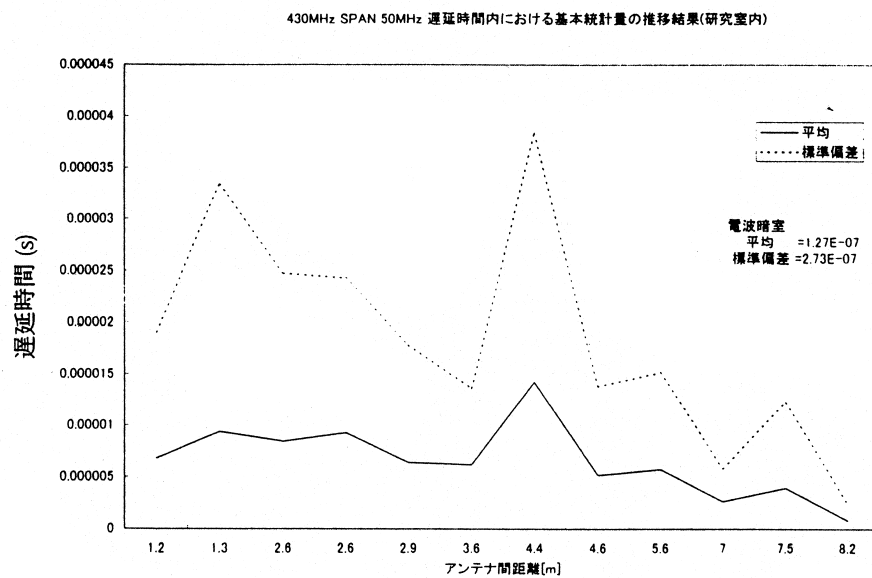
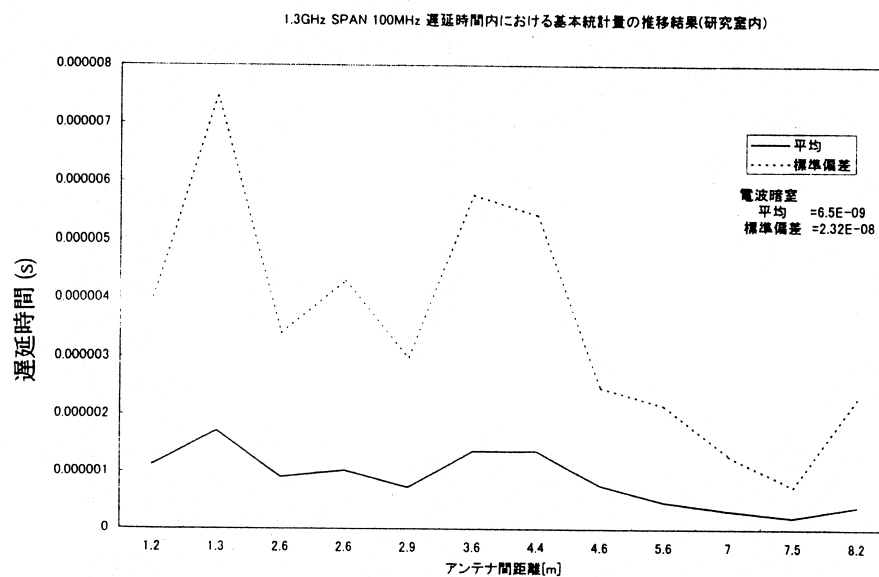


図8 研究室と電波暗室での遅延特性測定結果の比較（送受信アンテナ間距離：4.4 m）

(1) 430 MHz



(2) 1.3 GHz



(3) 2.5 GHz

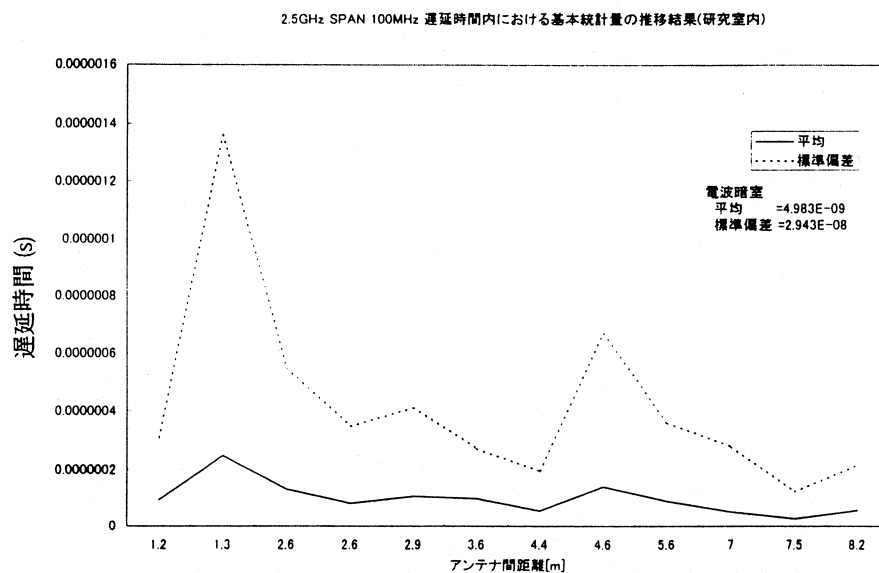


図9 研究室内における遅延時間（平均および標準偏差）の距離変化

4 あとがき

今後ますます加速すると思われる高齢化社会においては、介護が重要な問題となり、現在介護補助者の養成が急速に行われつつある。一方、第3者の世話になりたくないという国民性的心情もあり、ロボットによる介護補助が期待されるのも当然である。人間に近いロボットの研究も盛んに行われているが、制御・監視情報の伝達は通常、有線が使用されている。病院・福祉施設・家庭等の物理的環境を考えると、無線による情報伝達が望ましいのはいうまでもなく、そのための屋内無線伝送方式および情報信号の処理方式ならびにそれらの結果を反映したロボットの最適制御技術の開発が喫緊の課題と考えられる。

本報告は上記開発の基礎となる、ロボットのための無線伝送方式について、屋内多重波環境での信号強度変動ならびに位相遅延特性についてまとめたものであり、研究は緒についたばかりである。現在所有しているのは小型ロボットであるが、さらに移動性の優れた中型ロボットを対象にセンサ・機能を強化し、これまで得られている屋内閉空間での各種電磁波伝送パラメータを用いて、入力対応特性の検討を進めていく予定である。また、屋内での複雑な伝送路においては、低い周波数帯の利用が有効であるが、一方、動画像等の広帯域信号を送送するには高い周波数帯の使用が望ましいこと等の観点から、監視・制御機能と伝送方式のトレードオフを行い、最適システムを提案していきたい。さらに、実際の介護用ロボット使用環境下で、高齢者・身障者等を対象としたフィールド実験等を実施し、提案システムの有効性を確かめると共に、さらなる改良を進めていく所存である。

無線ロボットは福祉利用のみならず、人の近付けない劣悪な環境や災害現場などでの利用など、多方面での応用が期待されるものであり、このような極限領域での無線通信においては従来の概念とは異なる新しい方式が必要と考えられる。今後とも、無線通信と移動ロボットの制御・監視という複合領域の研究を通じて、高齢者・身体障害者の福祉さらには災害環境における安全・防護に貢献することとしたい。

おわりに、本研究の機会を与えて頂いた財団法人電気通信普及財団の研究助成に心から感謝の意を表する。

参考文献

- (1) M.Yamada, J.Yoshida, M.Takaoka: "Statistical Characteristics of Signal Level Variations due to Shadowing by Human Bodies in Wireless LAN", Proc. of 3rd APCC '97, pp.1408-1412, Sydney (1997)
- (2) 山田松一、吉田純大、高岡恵:「無線LANにおける信号強度変動特性 人の移動による」、日本学術会議電波科学研究連絡委員会第413回F分科会研究報告(1997)
- (3) 山田松一、吉田純大、高岡恵:「無線LANにおける信号強度変動分布特性 人の移動による -」、電子情報通信学会ユニバ・サル・パ・ソナル通信基礎研究会(1997)
- (4) 山田松一:「無線ロボットの走行制御について」、東京工科大学研究報告、TIN-Y-1999 (1999)
- (5) 染谷真美、黒田道子、山田松一:「FT-TD法を用いた人の移動によるアンテナのシャドウイング」、電子情報通信学会総合全国大会 (2000)
- (6) 大川隆久、山本竜也、斉木竜也、山田松一:「1.3 GHz帯におけるオフィスル・ム内での人体によるShadowing」、電子情報通信学会技術研究報告、AP98-161(1999)
- (7) 山田松一、勝見義之、岩間信繁:「UHF帯における室内多重波伝搬特性(その1)」、東京工科大学研究報告、TIN-Y-015 (2000)

< 発表資料 >

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
無線ロボットの走行制御について	東京工科大学研究報告	1999年12月
UHF帯における室内多重波伝搬特性(その1)	東京工科大学研究報告	2000年1月
FT-TD法を用いた人の移動によるアンテナのシャドウイング	電子情報通信学会総合全国大会	2000年3月