

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-11-10

人体通信によるユーザビリティの向上： タッチ式ドアエントリーシステムの開発

吉田, 森之介 / YOSHIDA, Shinnosuke

(発行年 / Year)

2005-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2005-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

修士論文

人体通信によるユーザビリティの向上
タッチ式ドアエントリーシステムの開発

2004 年度

法政大学大学院 工学研究科 システム工学専攻

修士課程

03R6133

ヨシダ シンノスケ

吉田 森之介

指導教授 渡辺嘉二郎 教授

Master's thesis

Development of Smart touch door entry system
which improve the usability by using intrabody communication

by Shinnosuke YOSHIDA

System Engineering,
Graduate School Engineering,
Hosei University

Abstract

Usability is an important aspect of universal design. Usability means that the shape of a design indicates its usage. In light of this concept, we introduced an intuitive key-less entry system using intrabody communication [1], [2] technology. Intrabody communication technology uses a human body as a transmission medium allowing wireless communication without employing airborne radio waves. When turning a door knob for the purpose of opening a door, intrabody communication sends an entry data through a human body. This reduces unnecessary action as well as entry time for door opening. To confirm the efficacy of this concept, we developed a simple demonstration circuit.

もくじ

第1章 はじめに.....	5
1.1 背景.....	5
1.2 従来の研究.....	7
第2章 システム構成と原理.....	8
2.1 システム構成.....	8
2.2 人体通信の原理.....	9
2.2.1 デジタル通信 ^④	9
2.2.2 デジタル変調.....	11
2.2.3 人体通信方式.....	12
2.2.4 人体通信理論.....	13
第3章 問題と仮定の記述.....	14
第4章 本システム試作機の開発.....	15
4.1 人体通信に適した信号の決定.....	15
4.2 人体通信の安定化.....	16
4.3 双方向通信の実現.....	17
4.4 個人認証機能の付加.....	18
4.4.1 スペクトラム拡散通信.....	18
4.4.2 拡散符号系列.....	18
4.4.3 M系列信号.....	19
4.5 人体通信による人体への影響の考察.....	20
4.6 使いやすさの考察.....	21
第5章 試作機的设计開発.....	22
5.1 マイコンの選定.....	22
5.1.1 マイコンによる搬送波出力について.....	22
5.1.2 マイコン出力による人体への影響.....	22
5.1.3 マイコンの構成回路.....	22
5.1.4 搭載マイコンの決定.....	23
5.2 ソフトウェア的设计開発.....	24
5.2.1 搬送波の生成.....	24
5.2.2 ID信号の生成.....	24
5.2.3 ID信号の出力.....	24
5.2.4 半2重通信の実現.....	25
5.3 ハードウェア的设计.....	26

5. 3. 1	信号処理回路の設計.....	26
5. 3. 2	マイコンのインターフェース設計.....	26
5. 3. 3	全システムの電力設計.....	27
5. 4	タッチ式ドアエントリーシステム.....	28
第6章	実験.....	29
6. 1	実験内容.....	29
6. 2	実験結果.....	30
第7章	むすび.....	31
付録	32
A1.	人体通信方式.....	32
参考文献	33
謝辞	35
研究成果	36

第1章 はじめに

1. 1 背景

近年の技術革新によりコンピュータの小型化や高性能化が進み、無線や通信技術の発展とともにモバイル環境や情報家電といったユビキタスコンピューティング^[1]が実生活に不可欠な存在になりつつある。Fig.1のようにまとめた2003年度版情報通信白書^[2]によると、インターネット普及率を例にとり見てみると年々利用者数が増加し、2003年の時点で日本の人口の60.6%もの人々が利用していることがわかる。しかしながら、年代別に見てみると均一に利用されているのではなく年代によってかなりのばらつきがあることが容易に理解することができる。しかも、それは一定の年代を超えると高齢者になればなるほど利用率が激減するのである。このような急速なデジタル化によって、パソコンや携帯電話といった情報機器をうまく扱える人々とうまく扱えない人々の格差が生じていることを示している。特にこの現象は、就職の際の不公平さや所得の差として表面化しデジタルデバイドと呼ばれる社会現象を引き起こしている。

このデジタルデバイドを引き起こす原因の1つとしては扱いにくい情報処理端末がある。それは高速かつ小型で高性能な機能を持ち合わせている一方で、実体のないデジタルデータを不慣れで身近でないキーボードやタッチキー・ボタンなどで扱うことが上げられる。もう1つとしては通信方法である。現在、広く普及している携帯電話やコンピュータといった通信方法は無線通信である。この無線通信は、通信ケーブルや装置といったものを意識せずに（実体がないにも関わらず）、広いもので基地を中心に半径数百メートルというものも存在する。この通信有効範囲内にいるだけで、お互いの通信機器はアクセス可能になる。と同時に、有効範囲内にいるだけでアクセスされる対象となり、無意識的かつ不正に標的になってしまう恐れがある。以上のような原因は、情報リテラシーというものを学習することで解決することができるが、高齢者にとって一から勉強しなおすことは非常に苦痛であり、結果としてこれがデジタルデバイドを引き起こされてしまう。

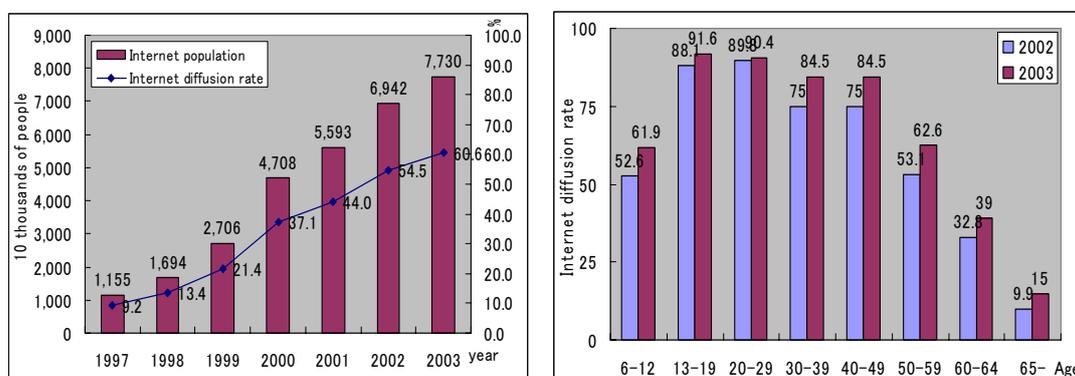


Fig.1 Internet population and diffusion rate

このようなこのようなデジタルデバイドを解消するために、われわれは人体通信方式を用いたシステムを提案する。人体通信方式とは、人体の一部をケーブルとして用いることで配線を気にすることなく通信をさせる方式である。これにより、対象に自らの意思で接触することで通信可能となる。接触行為は、触れた感触が触覚としてフィードバックされるため無意識的な入力を排除できる。このため無線通信よりも人体通信の方が通信状態をイメージしやすい。加えて、メタファやアフォーダンス^[5]を用いて接触行為を誘発することで、使用者がこれまでの生活を通して得てきた経験と視覚情報をフィードバックして照らし合わせるため、操作方法についても直感的に特別な学習なしに理解することが容易になる^[4]。

本研究手段の他にも、デジタルデバイドを解消するためさまざまな研究が行われてきている。その中でも設計の時点で誰でも親しみやすく使いやすくする情報のユニバーサルデザイン化という研究がある。これは情報機器や Web コンテンツにおいて、使用者が持つメタファやアフォーダンスによってユーザビリティやアクセシビリティ性を向上させるものである。これにより、対象システムのいかなる状態も使用者が直感的に特別な学習なしに把握・確認することで、情報のユニバーサルデザインを実現するというものである^[5]。また、T. G. Zimmerman によって、有線通信や無線通信に代わる新しい通信方式として、人体を伝送路とした人体通信を提案した^[6]。適用システムとしては、Fukumoto らにより FingeRing^[7] が提案された。このシステムは、各指の先端に加速度計を装着し、人体通信によって一つのマイコンに繋がれる。これによって、どのような場所においても、指の動きによって、あたかもそこにキーボードがあるかのように PC にタイプ入力できるものである。この研究は、人体通信を用いたシステムを構築することで人体通信の有用性を示した研究が主である。

以上に示した研究は、現段階において独立した研究であり、本研究のように、人体通信とメタファやアフォーダンスを用いて相乗的に、システムの扱いやすさを向上させる研究は新規性があると言える。そこで、本研究の有用性を示すために、自動車や入出管理で普及してきているドアエントリーシステムを例に適用した。

1. 2 従来の研究

ドアエントリーシステムは、現段階において研究の段階から製品として開発されて普及しつつある。このシステムは適用する対象（自動車・玄関・オフィス・研究室など）によってさまざまな製品が出てきている。それらは大きく分けて無線通信認証方式と生体情報認証方式がある。以下に両方式の長所と短所を述べる。

無線通信認証方式は自動車に多く搭載され、鍵情報を無線技術で通信し、小型で手軽に早く簡単にドアを開閉できる。鍵自体は譲渡可能なため不正に複製されたとしても認証してしまう可能性がある。また、無線という性質上、通信範囲内にいるだけで無意識的にドアが開閉してしまう可能性があるため扱いやすいが安全とは言い切れない。生体情報認証方式は、鍵として個人固有の指紋や虹彩・静脈パターンを用いる。個人の生態情報を用いるため鍵の複製が非常に困難なため機密性が非常に高い。しかし、直接センサに接触して鍵情報を入力することで、認証のために複雑な動作が要求される。また、認証レベルにより認証精度のばらつきや認証時間もたつきがある。これにより、この方式は、条件によっては非常に安全であるが扱いにくいといえる。

本研究が提案する人体通信認証方式は、対象との接触による認証である。これによって、情報の漏洩を気にせずすみ、加えて、通信しているかどうか触覚を通じて認識することができる。また、メタファやアフォーダンスによって直感的に操作法が理解することができるため、扱いやすいシステムを構築することができる。

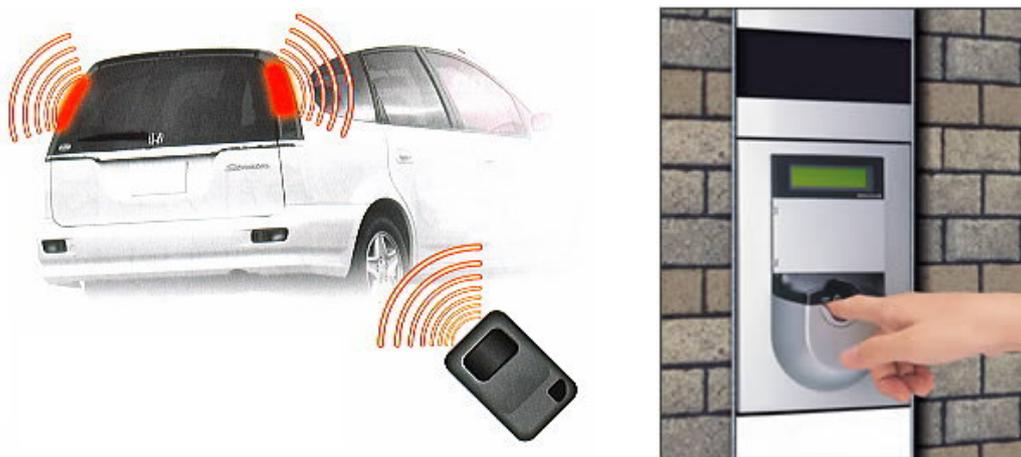


Fig.2 The conventional research

第2章 システム構成と原理

2. 1 システム構成

Fig.3 に本ドアエントリーシステムの構成図を示す。構成図においては、(a)ドアノブを通信アンテナとして認証モジュールを設置し、(b)使用者に ID モジュールを装着させる。本システムにおける使用者が行う動作は以下のとおりである。

- ① 使用者がドアを開けようと、ドアに接触する
- ② ドアを開けるため、ドアを押す/引く

以上の動作のみで使用者とドアとの認証を行うため、データの流れは以下のようになる。

- (1) ドア ID 信号がドアノブから人体へ伝達する
- (2) 人体通信により人体を介してドア ID 信号が人体装着装置へ伝達される
- (3) ドア ID 信号を認証したら後、ユーザ ID 信号を人体へ伝達する
- (4) 人体通信により人体を介してユーザ ID 信号が設置装置側へ伝達される
- (5) ユーザ ID 信号を受信し認証したらドア開閉制御信号を出力する

以上の動作を瞬時的に実行するために、動作(1)~(6)の処理速度を速める必要がある。そのために、本システム実現のためマイクロコンピュータ（以下マイコン）を用いた。

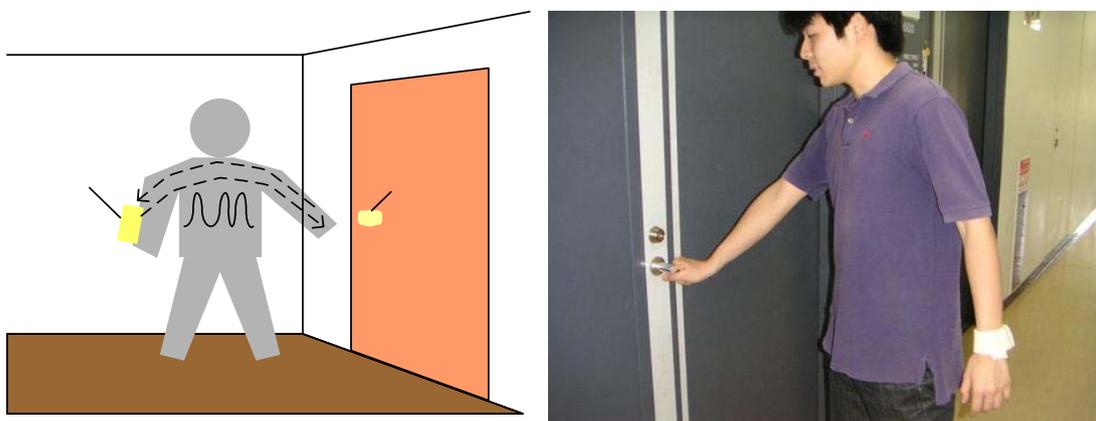


Fig.3 System configurations

2.2 人体通信の原理

2.2.1 デジタル通信^[8]

データ通信方法には Fig.4 で示すようなアナログ通信とデジタル通信という 2 つの方法がある。

アナログ通信とはデータとして時間的に連続なアナログ値を用いる。送信側では送りたい情報 (10) を電気信号である電圧値 10V として送信する。そして、受信側で電圧 10V を受けることで届けられた情報は (10) となり通信が完了する。

デジタル通信とはデータとして離散的なデジタル値を用いる。送信側では 10 進数である (10) を 2 進数である (1010) に変換する。その後、“1” に対しては 10V、“0” に対しては 0V として送信する。受信側では、信号がある状態 (10V 受信) を “1”、信号がない状態 (0V 受信) を “0” として扱う。そしてそれらの離散値をつなぎ合わせて受信情報を 2 進数で (1010) としてから 10 進数で (10) と変換し通信が完了する。

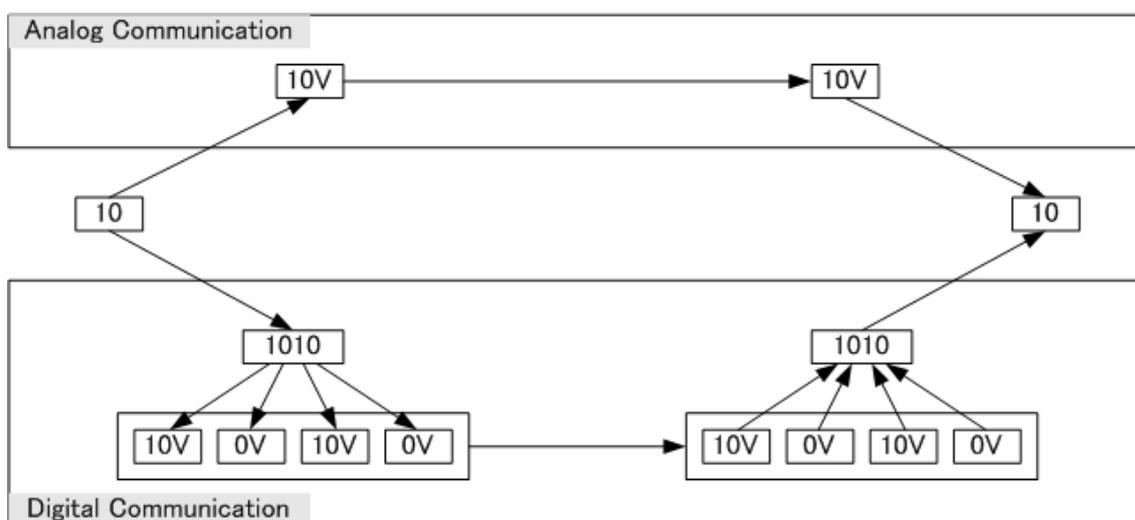


Fig.4 Analog communication and Digital Communication

現実の世界では通信において必ずノイズの影響を受ける。ノイズによる影響は通信途中で電圧変化が発生する。この状況において、デジタル通信はアナログ通信に比べて情報の誤差が非常に強い特徴を持っている。ノイズによるデータ通信の影響を Fig.5 として以下に示す。

アナログ通信では、受信電圧をそのままデータ情報として受け取ってしまう。これは Fig.5 のように送信機が (10) という情報を送信した場合、ノイズによって送信電圧が 2V 低下して受信機に通信されても、受信情報は (8) となってしまう。

デジタル通信では、(10) という情報を 2 進数として (1010) とした後、送信する。このように信号の強弱で “1”・“0” を判断できるので、Fig.5 のようにノイズによって受信電圧が変化しても、ある一定の値 (閾値) で区切ってやることで受信電圧は “10V”・“0V”・“10V”・“0V” と補正することができる。これを 10V を “1”, 0V を “0” に対応させることで、2 進数で (1010) となり、10 進数に変換して受信情報が (10) となる。

このようにデジタル通信は、アナログ通信と比べてシステム的には複雑になるがノイズに対して強く、通信エラーが少ないといえる通信方法である。

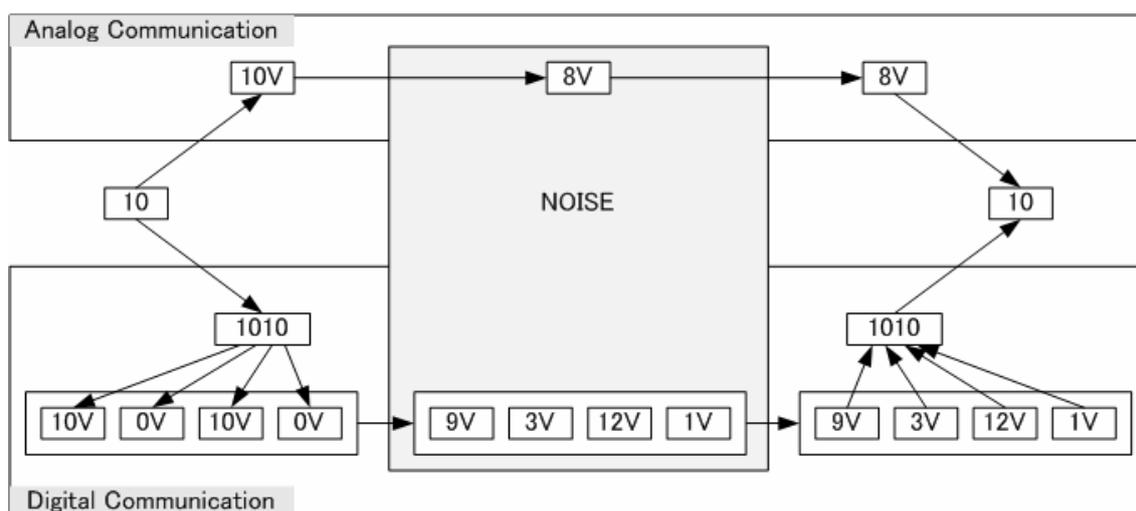


Fig.5 Analog Communication and Digital Communication in the actual environment

2.2.2 デジタル変調

変調とは、ある信号を送信機から受信機へ伝送する際に適した波形に変換することを変調という。変調操作は比較的近い距離で通信を行う場合で変調操作を行わないこともありますが、遠距離や複雑な情報信号波形の場合は変調を施すものである。この変調とは大きく分けてアナログ変調とデジタル変調に分かれる。送りたい情報を表す電気信号をベースバンド信号と呼ぶ。このベースバンド信号の波形を送りたい場合に用いる変調をアナログ変調と呼び、またベースバンド信号の波形が持つ意味を伝えたい場合に用いる変調をデジタル変調と呼ぶ。伝送路を伝播する電波には伝播に適した周波数が選ばれ搬送波(carrier)と言い、この電波に送りたいデータ信号を重畳することで通信を行わせる。

アナログ変調には、振幅変調(amplitude modulation; AM)と周波数変調(frequency modulation; FM)、位相変調(phase modulation; PM)の3つがあり、基本的に同様なデジタル変調において、以下の Fig.6 のような波形で ASK(amplitude shift keying), FSK(frequency shift keying), PSK(phase shift keying)に分けられる。ASK とは、同じ周波数・位相で異なる振幅を持つ2つの搬送波を用いてデジタル信号を構成する。FSK とは、同じ振幅・位相で異なる周波数を持つ2つの搬送波を用いてデジタル信号を構成する。PSK とは、同じ振幅・周波数で異なる位相を持つ2つの搬送波を用いてデジタル信号を構成する。

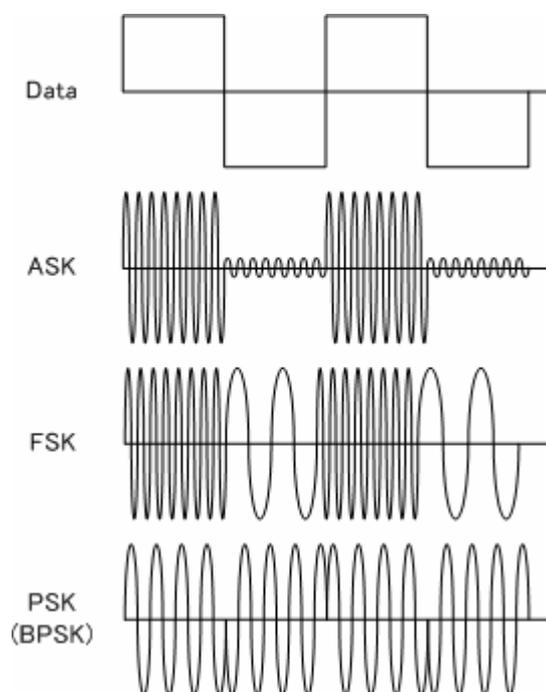


Fig.6 Each modulated waveform

2.2.3 人体通信方式

人体通信方式とは、人体を信号線として通信する方式である。ある機器 A・B 間同士を Fig.7 のように有線通信させる場合、信号線と基準線の少なくとも2本の配線が必要になる。この2本の配線により機器 A・B 間に閉ループを構成する。これにより電流が流れ通信を行うことができる。人体通信は、ケーブルの代わりに機器 A・B 間の人体を信号線として、基準線をどのように取るかで3種類的方式^{[9],[10],[11],A1}がある。本研究ではその中でも、安定性が一番高いとされる人体全部を基準線の一部とする方法を採用した。その原理図を Fig.8 として示す。

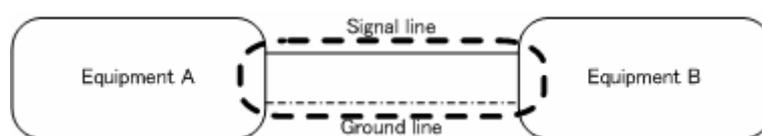


Fig.7 Principle of wire communication

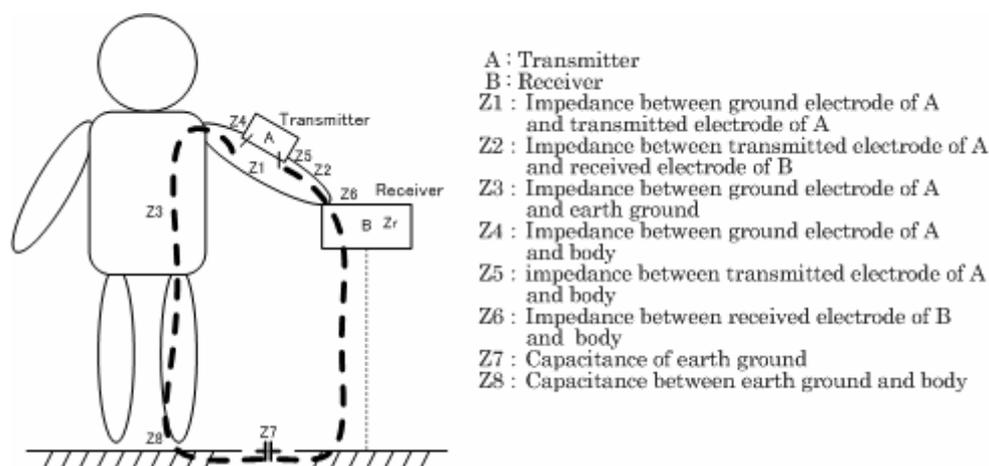


Fig.8 Principle of intrabody communication

2.2.4 人体通信理論

人体通信原理図からどのように電気信号が伝達するかを求めるために、等価回路図から伝達電圧値を求める。示した人体通信原理図より、等価回路図は Fig.9 のようになる。

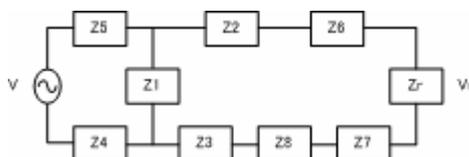


Fig.9 The equivalent circuit of the human body communication

さらに人体装着部位付近においての電圧降下あまり生じないため、Fig.10 のように近似・簡略化した。

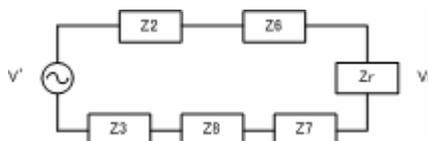


Fig.10 The approximate equivalent circuit

本システム等価回路図 Fig.10 より設置装置側の受信電極に伝達する電圧 V' は式(1)のようになる。

$$V_r = V' \times \frac{Z_r}{Z_2 + Z_3 + Z_6 + Z_7 + Z_8 + Z_r} \quad (1)$$

$$V' \cong V \times \frac{Z_1}{Z_1 + Z_4 + Z_5}$$

式(1)より、人体通信による信号伝達強度は原理図で示した各インピーダンス値の分圧により伝達することが分かる。

第3章 問題と仮定の記述

本システムを開発する上で、以下の制限を仮定する。

(A1) 鍵モジュールを持つ人は、ペースメーカー等の健康維持装置を装着していないものとする。

以上の仮定の下、以下のような問題を考える。

- (P1) 人体通信に適した信号を求める
- (P2) 安定的な人体通信を実現する
- (P3) 人体側・装着側の双方向通信を実現する
- (P4) ID 信号を生成する
- (P5) 人体通信による人体への影響を考察する
- (P6) 直感的に扱いやすいシステムを構築する

第4章 本システム試作機の開発

4.1 人体通信に適した信号の決定

本セクションでは(P1)について考察する. 本システムは使用者と対象ドアとの通信方法として人体通信を適用する. 原理図より通信経路には静電容量があるためある一定の周波数を越えた信号であることが予想される. また, 本システムはマイコンが出力する信号によって通信を行うので, 入力信号の種類を5VのTTL信号を搬送波として使用することにする. 以上を踏まえて, どのような周波数の信号が搬送波に適しているかどうかを調べるために, Fig.11 で示すような基礎実験を行った. 実験内容としては, 5VのTTL信号で任意の周波数を出力することができるオシレータを被験者の体に出力させる. その状態で周波数を変えながらバッファ回路の入力に触れ, その出力電圧をオシロスコープで波形を調べるというものである.

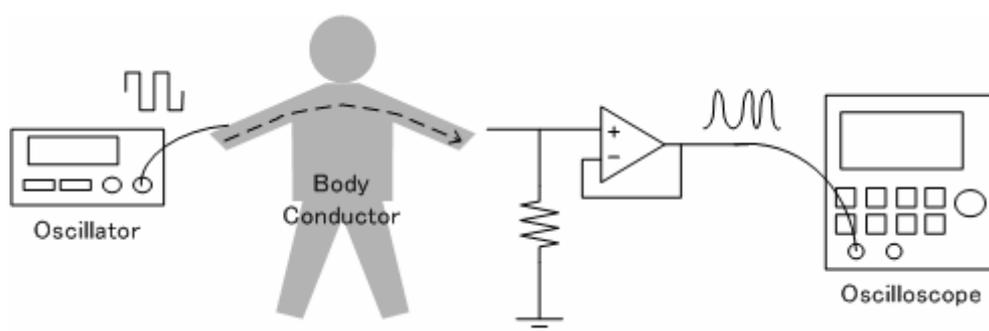


Fig.11 Basic experiment for intrabody communication

Fig.12 はオシロスコープ上で入力波形と出力波形を同期して, スケールを変えて出力させた実験結果の一例である. この実験結果より, 人体通信に適している信号は 100kHz 以上必要であるということが分かった[12]. これにより, 本システムで適用する搬送波は 100kHz 以上とし, 受信側でこの受信信号を任意のレベルまで増幅することで通信できることが分かった.

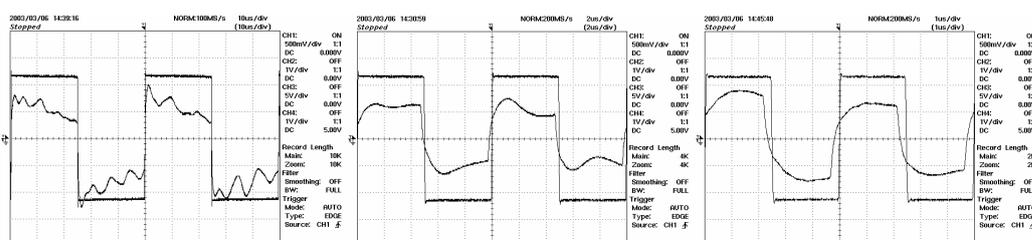


Fig.12 Output signals through the body conductor
(left, center, right: 2kHz, 20kHz, 100kHz)

4.2 人体通信の安定化

このセクションでは(P2)について論じる. 式(1)における受信電圧 V_r は, Fig.8 で示したインピーダンス値の分圧により求められることが分かった. 各インピーダンスの $Z_1 \sim Z_6$ は, 体格・体脂肪率や性別などの身体的要因に左右され, $Z_7 \sim Z_8$ は使用時の気温・湿度といった環境的要因に左右される. これにより, 使用状況によって受信電圧レベルにばらつきが生じてしまうため, 通信の安定化対策を施す必要がある. 実際に, 幾人かの協力のもと Fig.11 の実験を行ってもらった. 実験内容は人体に 200kHz の TTL 信号を入力し, 出力信号を計測するものである. その結果, 出力電圧は 0.2V~1.5V であった. 本研究では受信信号をマイクロコンピュータで検知・認証を行うため, マイコンの受信ポートまでにある一定の閾値を越える増幅をしなければならない. そのため, 受信検知状態によって, 人体通過後の減衰された信号を増幅する増幅部分にフィードバック機構を加えることで克服した. 信号を人体に送信し, その信号をマイクロコンピュータで処理するまでの流れを Fig.13 にシステム構成図として示す.

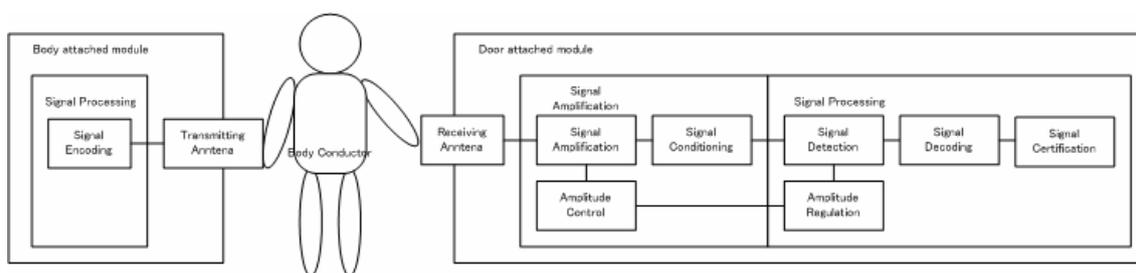


Fig.13 Configuration of our system from transmitter to receiver

4.3 双方向通信の実現

このセクションでは(P3)について論じる。これまで、本研究は機器間通信に信号線が一本で実現できアルゴリズムが簡単な単信通信方式を採用してきた⁸⁾。しかし、この方式では情報の流れが片側一方通行に限られてしまい、お互いの状態を共有できない状況にあった。そのため、お互いの状態に関係なく信号を通信しつづけるため、アプリケーションが単純になり無駄に電力も消費してしまう結果となった。そこで、信号線が一本で双方向通信を実現させるため半2重通信方式を実装した。実装方法は、マイコンのポート状況により入出力設定を変更することで、人体装着側とドア設置側の受信モードと送信モードがタイムスケール上で重ならないように制御した。このようにすることで、信号線が一本でお互いの情報を共有することが可能な双方向通信である半2重通信方式を実装することができた。半2重通信方式を実装するためのシステム構成図を以下に Fig.14 として示す。

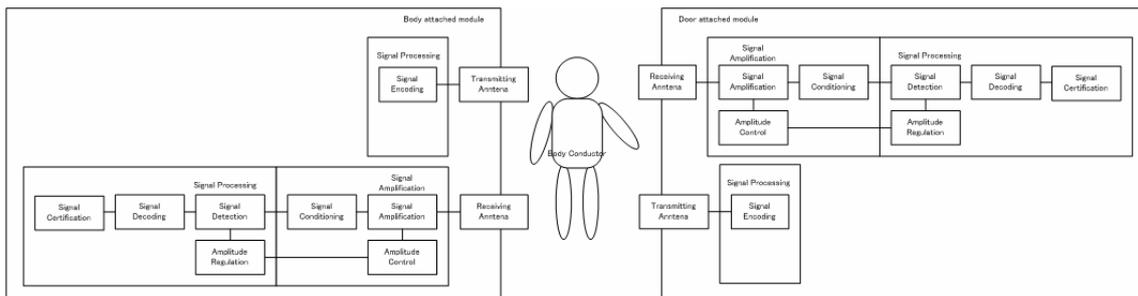


Fig.14 Configuration of our system

4. 4 個人認証機能の付加

このセクションでは (P4) について論じる。マイコンによる認証信号は不規則性かつ一意性を保つ必要がある。また、人体を信号が通過する際に多くのノイズが信号に乗ってしまうためノイズに対して強くないといけない。そこで、我々は拡散符号系列を用いたスペクトラム拡散通信に着目した。

4. 4. 1 スペクトラム拡散通信

拡散符号系列とは、“1”と“-1”で構成される擬似的な乱数である。スペクトラム拡散通信とは送信したいデジタル信号と拡散符号系列を掛け合わせて出力信号を変調する。そして、その信号を搬送波にのせて受信し、復調するには掛け合わせた拡散符号系列と同一な符号が必要となるため機密性を保持することができる。また、ノイズに強く、過密状態になっても急激な品質低下を起こさないなどの特長を持つ。このような理由からスペクトラム拡散通信を採用する。

4. 4. 2 拡散符号系列

スペクトラム拡散通信を行うには、擬似乱数系列である拡散符号系列が必要である。よく知られている擬似乱数系列に M 系列や Gold 系列というものがある。M 系列は優れた相関特性を持つが符号系列が少ないという欠点から、シングルユーザーのスペクトル拡散に用いられる。測距、レーダといった軍用に広く応用されていたものである。一方、Gold 系列はその符号系列の多さからマルチユーザー対象のセルラーや CDMA 通信システムに適応される。これら2つの特徴を Table.1 のように以下にまとめた。以上の考察より本システムで扱う擬似乱数系列は M 系列を用いることにする。

Table.1 The comparison table of M sequence and Gold sequence

Sequence	maximal-length	Gold
characteristic	The excellent correlation characteristic	The quantity of the code sequence
Target	Single use	Multiple use
Application System	Spectrum Spread Communication	Code Division Multiple Access

4.4.3 M 系列信号

M 系列（最長系列）とは，ある長さのシフトレジスタとフィードバックによって生成される符号系列のうち，その周期が最長になる系列をいう． n をシフトレジスタの段数とすると， $L=2^n-1$ ビットが M 系列の長さ，すなわち最長系列である．シフトレジスタ符号発生器(shift register sequence generator : SRG)は，Fig.15 に示すように何段かのシフトレジスタとその複数個の段の状態の論理結合をシフトレジスタの入力へフィードバックする論理回路とで構成される．ここで f_j はシフトレジスタにかける係数（0 または 1）， a_i はシフトレジスタの各段の内容である．

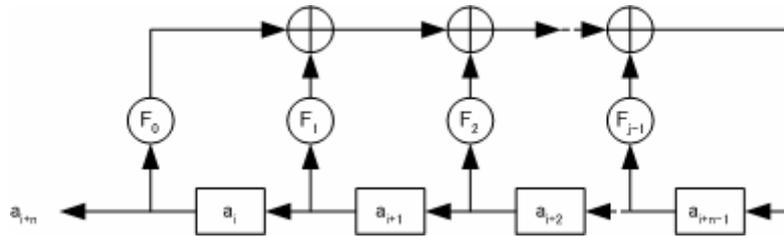


Fig.15 Shift register sequence generator

上の回路で発生される系列は，

$$a_{i+n} = \sum_{j=0}^{n-1} f_j a_{i+j} \tag{2}$$

式(2)は， $f_n=1$ として次のようにも表せる．

$$\sum_{j=0}^n f_j a_{i+j} = 0 \tag{3}$$

これらの式は系列を発生させる線形漸化式と呼ばれる．ここで $a_{i+j}=x^j a_i$ となるような遅延演算子を導入すると式(3)は，

$$\left(\sum_{j=0}^n f_j x^j\right) a_i = 0 \tag{4}$$

となる．ここで，

$$\begin{aligned} f(x) &= \sum_{j=0}^n f_j x^j \\ &= f_n x^n + f_{n-1} x^{n-1} + \dots + f_1 x + f_0 \quad (f_0 \neq 0, f_n = 1) \end{aligned} \tag{5}$$

なる多項式は，特性多項式と呼ばれ，発生する系列の性質を決める重要な多項式である．この原始多項式より， n ビットの情報から (2^n-1) 個の異なる一意的な乱数信号を生成することができる．

4.5 人体通信による人体への影響の考察

本セクションでは(P5)について考察する。人体通信は、人体を信号線として用いるため人体に電氣的負荷をかけることになる。そこで、人体に対する電氣的負荷の影響をここでは考察する。人体に電流を流すということは、その強度によって生体対して多くのダメージを与える。近年、小型無線機や携帯電話・無線 LAN 通信により出力される信号の人体影響について、多くの研究機関で研究されている。その中で、各研究機関からの研究結果統括している国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection^[13])をもとに人体への影響を調べた。ICNIRP による人体に電流を負荷した際の安全基準を Table.2 としてまとめた。これによると、人体への影響は、4段階で評価され、流れる電流値とその電流の周波数に依存することが分かった。従って本システム構築の際には、ICNIRP の安全基準を満たした設計を行う。

Table.2 Standards of the ICNIRP guidelines

Indirect effect	Threshold current (mA) at frequency			
	50 Hz	1k Hz	100k Hz	1M Hz
Touch perception	0.2 - 0.4	0.4 - 0.8	25 - 40	25 - 40
Pain on finger contact	0.9 - 1.8	1.6 - 3.3	33 - 55	28 - 50
Painful shock	8 - 16	12 - 24	112 - 224	Not determined
Breathing difficulty	12 - 23	21 - 41	160 - 320	Not determined

4. 6 使いやすさの考察

このセクションでは(P6)について論じる。ある道具を学習なしに利用するためには、その道具そのものがどう使われれば良いのかという情報を強く発していなければならない。このような特性はアフォーダンスとよばれ、例えば、Photo.1 で示すようなはさみやピンセットでは、二股の先端を持つという形状が物体を挟むことをアフォードしている。多くの人々に利用されている既存の道具は、良いアフォーダンスを持っていると同時に、操作に関するメンタルモデルが幼少の頃からユーザの中に形成されている。加えて、このような道具を使用する際、微妙な操作の状態がユーザへ触覚や視覚といった感覚としてフィードバックされる。これにより、対象物体の性質を理解する上での重要な手助けとなっている。

本研究においては、ドアにおけるアフォーダンスについて着目した。ドアにおけるアフォーダンスとは Photo.2 で示すようなものがある。左図は同一のドアであるがノブの色が全体に比べ違う白色となっている。これにより、白色の部分に触れてドアを開け閉めすべきだと認識できる。また、ノブの形状によって掴む状態にないとき押戸であり、掴める状態であるとき引戸であると認識することができる。右図においては、ノブが掴める状態にあり一端でドアと繋がっている。これにより、ノブ掴んで回すことで門を解除するのではないかという認識ができる。

このように、ドアにおける有効なアフォーダンスの多くはドアノブに存在すると言える。そこで、本システムを設置するドアは掴める状態にあるドアノブに設置することにする。



Photo.1 The familiar example of affordance



Photo.2 The example of door affordance

第5章 試作機の設計開発

第4章で述べた考察のもと，本セクションはシステムを試作するために大きく分けてマイコンの選定とハードウェア設計・ソフトウェア設計に分けて説明する。

5.1 マイコンの選定

システムに搭載しうるマイコンは，世の中に製品として大量に出回ってきている．それらは用途・目的によって使い分ける必要がある．そこで，本セクションでは搭載するマイコンを検討する．本システムに搭載するマイコンの決定条件は以下の通りである．

- ① 人体通信可能な搬送波が出力可能であるか
- ② 搬送波の人体への影響が無視できる程度出力値であるか
- ③ システムが大きくならないか

5.1.1 マイコンによる搬送波出力について

①について考えると，100kHz以上であれば通信できることが分かっているので，100kHzの搬送波を一つの基準として考える．1周期の搬送波とは，“0”→“1”→“0”という信号変化である．この出力を行うための処理速度は350kHz程度以上で駆動するマイコンであればよい．この程度のマイコンは最近入手できるほとんどのマイコンにおいて満たしているので問題ないと思われる．

5.1.2 マイコン出力による人体への影響

②について考えると，一般にマイコンの出力電圧は5Vであり，人体の皮膚表面の抵抗値は100k-1M Ω である．これらの値からオームの法則により，人体に及ぼす電流値を求めると5-50 μ Aという値となる．Table.1で示した搬送波100kHz以上のときのICNIRPガイドラインは人体への体感できる影響は25-40mA程度であると示している．これら数値を比べると，約1/1000の値となり5V出力のマイコンであれば安全であるといえる．

5.1.3 マイコンの構成回路

③について考えると，マイコンをシステムに組み込む際，マイコンを正常に動作させるための外部回路が必要となる．それには同期駆動に必要なクロック回路やメモリ回路など，マイコンによっては外部回路として実装する必要がある．特に人体装着側機器においては，腕時計のように小さくなくては携帯に不便である．そこで，メモリ機能内蔵でクロック回路が単純なマイコンが望ましいと考えた．

5. 1. 4 搭載マイコンの決定

以上の考察より，本システムに搭載するマイコンをマイクロチップ製 Peripheral Interface controller (以下 PIC) 16F84A^[14]とした．PIC-16F84A の概観とスペック表を以下に Photo.3 と Table.3 として示す．最大クロック周波数は 20MHz であり，1 命令を 5MHz のスピードで計算できる．これにより，100kHz 以上の搬送波が容易に作れる．出力電圧は，4.5V~5.5V であり先述した ICNIRP ガイドラインにおいても十分な安全性能が確保できる．本システムに搭載する PIC はメモリ内臓型であり，Fig.16 に示すように外部回路が簡単なためマイコンを組み込んだ際のシステムも小ささを確保ができると思われる．加えて，このマイコンは秋葉原での販売価格が 350 円と低価格で購入でき，多くの書籍などの情報があるということも搭載への決め手になった．



Photo.3 Appearance of PIC16F84A

Table.3 Spec table of PIC16F84A

PIC-16F84A	8bit micro computer
Size	43mm x 6.3mm x 2.3mm
Operating Frequency	20MHz
Program Memory	1K Words
Data Memory	68Byte
EEPROM Data Memory	64 Byte
Voltage Range	4.5V~5.5V
Output Voltage	0V(low)-5V(High)
I/O Port	
Output Carrying Capacity	< 25 mA

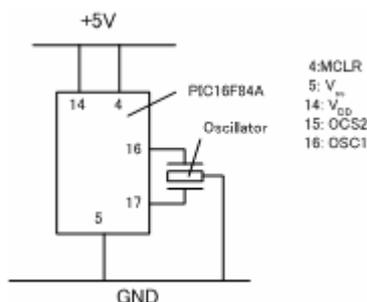


Fig.16 PIC16F84A's external circuit

5.2 ソフトウェア的设计開発

PIC16F84A のプログラムを開発するに当たって、システムデベロップメントキットとして Microchip 社が無料提供する MPLAB6.60^[15]を用いた。MPLAB6.60 において PIC アセンブラを開発言語^{[16],[17]}として以降開発を進める。

5.2.1 搬送波の生成

人体導体はある種のハイパスフィルタのような振る舞いをするため、搬送波の周波数が高ければ受信レベルが高くなる。そこで、PIC マイコンの計算能力を考慮した上で、人体通信には 400kHz の搬送波を用いる。そして、1 ビットあたりの搬送波出力時間を 500 μ s としてプログラミングした。

5.2.2 ID 信号の生成

ID 信号生成には 4.4 で述べたように M 系列信号を用いる。現試作段階において、マイコンが 8 ビットであること計算が単純であること・計算時間が早いことから、簡単のために 3 次原始多項式を用いて、 2^3-1 個すなわち 7 個の信号長 7 ビットの異なるユニークな信号を生成した。このことは、本システムは 7 通りのチャンネルを持つことを意味する。

5.2.3 ID 信号の出力

各機器に対して ID 信号を出力する際、受信側は受信するために信号に対して同期を取る必要がある。そのため、ID 信号の前に“1111”のスタートビットを含めて出力することにした。この“1111”スタートビットは 3 次の M 系列信号において、生成されるはずのない信号であるため、この信号をきっかけに受信側は同期が取れる。これにより、送信信号は全部で 11 ビットとなり 5.5ms となった。Fig.17 として以下に ID 信号の出力アルゴリズムを示す。

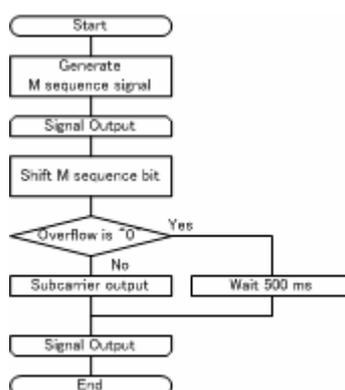


Fig.17 Algorithm of Output ID signal

5. 2. 4 半2重通信の実現

半2重通信は信号線が1本で双方向通信を行う通信方法である。本システムではマイコンは出力ポートと入力ポートを分けているので、これら信号線を1本にまとめる必要がある。そこで、エッジ割込み機能があるRB0を信号入力ポートとし、RA0を出力ポートとし、アンテナ部分に結線し信号線を1本とした。この状態で、これらRA0/RB0の入出力ポートをタイムスケールの異なるように切り替えて制御をすることで送受信部分を一緒にして半2重通信方式を実装した。

人体装着側・ドア設置機器間の通信アルゴリズムをFig.18として簡単示す。まず、初期設定として各機器内のメモリの初期化およびID信号の生成を行う。そして、ドア設置側機器はID信号を発振する送信モードと人体装着側から来る信号を受け取る受信モードを繰り返す。人体装着側機器は、ドア設置側からの信号を受けるまで受信モードに設定し、受信信号を受け取って認証が完了したときのみ送信モードに切り替えて人体側のID信号を出力する。そして、受け取った人体IDを認証することで対象ドアを開閉するための制御信号を出力する。これら送受信モードをタイムスケールの異なるように切り替えるように制御することで半2重通信を実現した。

このように、必要な時だけ人体装着側から信号を出力することで人体を通過する信号回数を必要最低限まで引き下げることができ、出力回数が減ることから消費電力の効率も改善することができた。

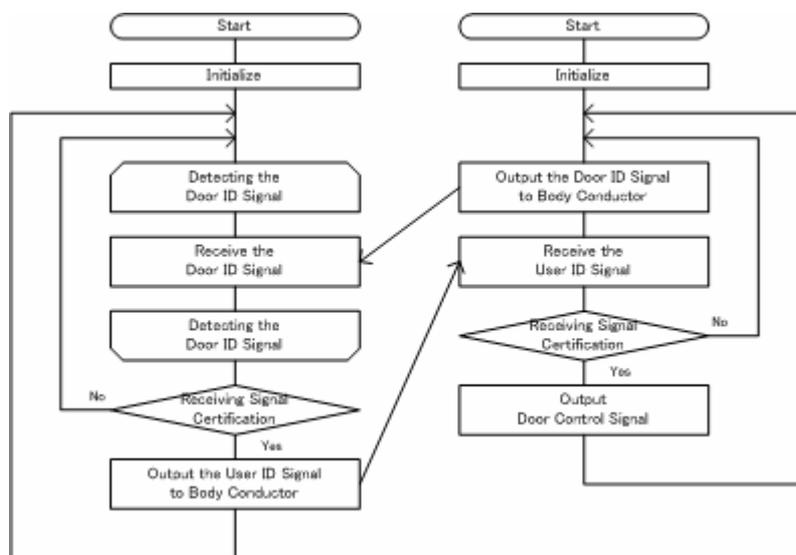


Fig.18 Algorithm of intercommunication

5.3 ハードウェア的设计

本システム構成は4.3章でも示した Fig19 のシステム構成図を回路によって実現する。

5.3.1 信号処理回路的设计

信号取り込みまでのシステムを设计する。受信部から受け取った信号を増幅するためオペアンプを用いる。受信信号は搬送波であり非常に高速であるため、オペアンプのスルーレートを考慮して LF347 というオペアンプを使用した。これにより、マイコンでの取り込み可能なレベル (5V) まで増幅をかける。入力信号は、体内導体を通過した信号であるため増幅を整形する必要がある。そこで、シュミット NOT 回路を2回用いることで体内導体によるノイズ処理を施し、マイコンの入力ポートと接続させる。

5.3.2 マイコンのインターフェース设计

次に、マイコンのインターフェースについて设计する。マイコンの入出力インターフェースは入力ポートを RB0, 出力ポートを RA0, マイコンで生成する ID 信号切り替えスイッチと状態確認 LED をそれぞれ RA1-3 と RB5-7 とした。安定通信実現のためには人体導体を通過した信号は使用者の個人差や使用状況といった環境差によっても一定増幅を行わせる必要がある。そこで本システムでは、信号入力があっても認証を行えなかった場合、RB4 ポートで増幅率を調整するフィードバック機構を実装した。その方法とは、増幅部分における抵抗値をリレーによって切り替える。これによって、受信信号の強弱によっても安定的な通信を実現することができた。

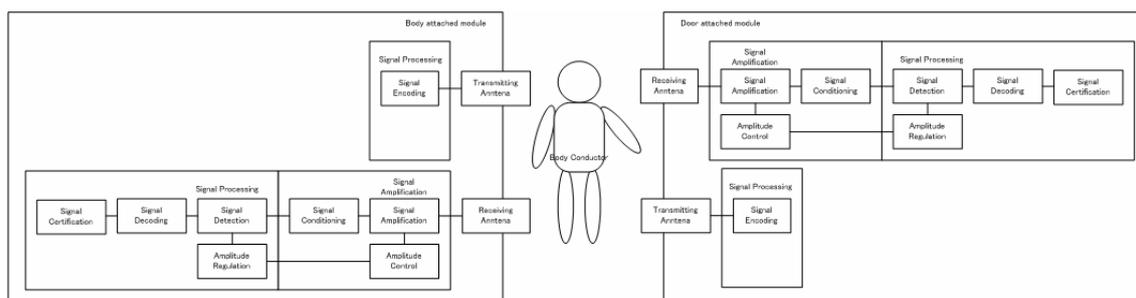


Fig.19 Configuration of our system

5.3.3 全システムの電力設計

本システム内で用いるマイコンおよびオペアンプ・ICはそれぞれ異なる駆動電圧である。そこで、最後にシステム駆動電力の設計する。システム全体の駆動電圧は、電池のある程度の電圧降下を想定して角電池9Vとした。マイコンやシュミットNOT-ICの駆動電圧は5Vのため、3端子レギュレータで5Vに降圧して電力供給を行う。また、オペアンプLF347の駆動電圧は±15Vであるため、MAX232-ICを用いる。MAX232-ICは5V印加することで、±15Vを出力することができる。これにより、オペアンプLF347に必要な電圧を引火することができる。受信信号の増幅ゲインを調整するリレーは、ある程度の電流が必要なため、電池電圧からトランジスタを介して駆動させる。以上を考慮に入れて、Fig.20のような回路図で本システムを試作した。

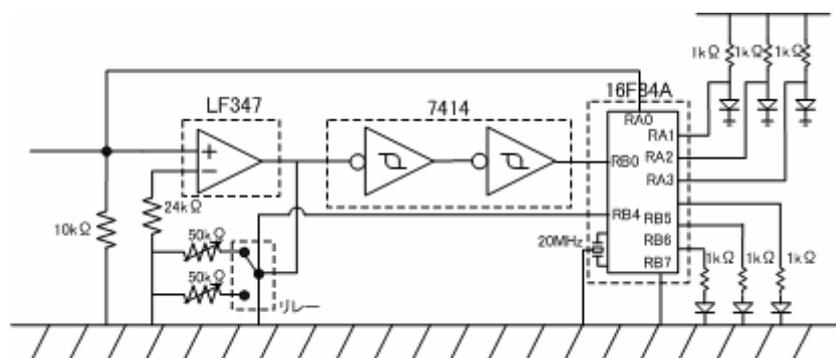


Fig.20 Circuit diagram of prototype

5.4 タッチ式ドアエントリーシステム

以上の本システム的设计を経て、人体装着側・ドア設置側機器を試作した。それぞれの機能は以下ようになる。

- ・ 人体装着側装置
 - －ドア ID 信号を受信・複号化する
 - －ドア ID 信号を認証する
 - －人 ID 信号を暗号化する
 - －搬送波を生成する
- ・ ドア設置側装置
 - －ドア ID 信号を暗号化する
 - －搬送波を生成する
 - －人 ID 信号を受信・複号化する
 - －受信信号を認証する
 - －ドアの開閉制御信号を出力する

以上を踏まえた上で、本システムの試作を行った。実際に作製したシステムの概観図を Photo.4 として、システムのスペックを Table.4 として以下に示す。

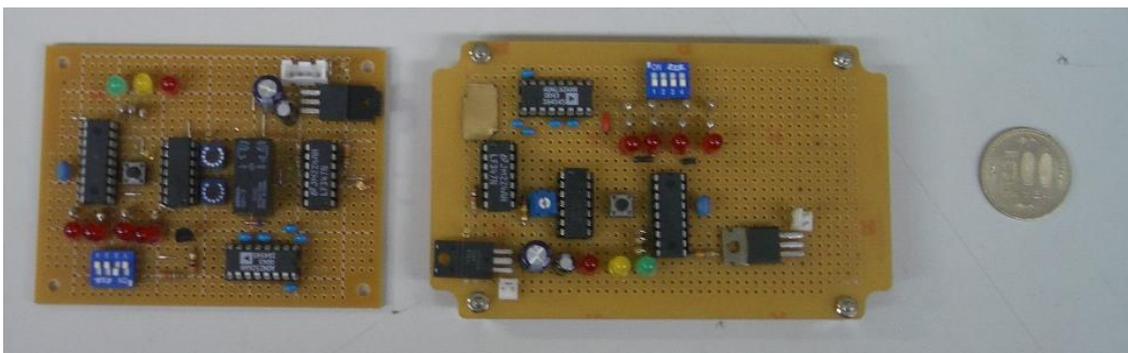


Photo.4 Appearance of prototype system (left: body attached, right: door attached)

Table.4 Spec table of prototype system

	Body attached System	Door attached System
Carrier Frequency (Hz)	400k	
Communication method	ASK modulation, Half Duplex	
Memory Size (bytes)	1792	
Channel (Number)	7	
System Size (mm)	95 x 70	165 x 70
Voltage (V)	9	

第6章 実験

6.1 実験内容

提案したシステムの優位性を実証するために、我々は試作機で動作実験を行った。実際の使用状況に合わせるため、人体装着側を角電池で電力供給を行い、ドア設置側は DC 電源を用いた。実験内容は Photo.5 のように腕に人体装着側装置を装着した状態で、ドア設置側装置の送受信電極部分を触れるというものである。このとき、さまざまな ID 信号を送信しても、正確に素早く認証し制御信号を出力できるかを実験した。正しく制御信号を出力するために、各機器の信号処理回路部分をオシロスコープで計測し、目的通り処理しているかを確認する。もう1つの方法として、多くの電磁ロック型ドアは、強力な電磁石をシンプルなオンオフ制御によって動作している。そのため、ドア設置側装置において、出力信号をオンオフ信号とし、その結果を複数の LED で光らすことで認証しているかどうかを視覚的に見極めることにする。

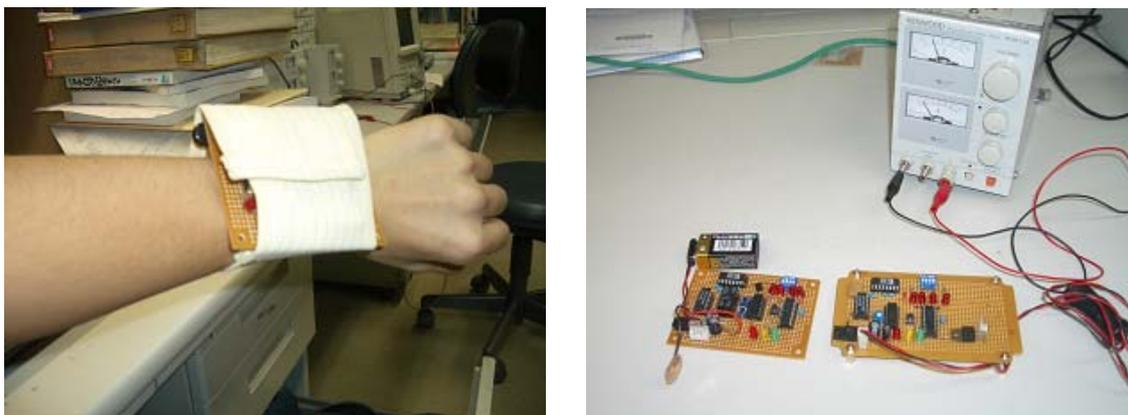


Photo.5 Experimental the environment

6.2 実験結果

まず、送信信号と人体導体通過後の受信信号について述べる。Fig.21 として送信側のマイコン出力ポートと受信側マイコン入力ポートをオシロスコープで計測した結果を以下に示す。これによって、送信 ID 信号は各機器内の信号処理回路部分でしく復号されていることが確認できる。この波形は送信側・受信側を同時に表示している。このことから人体導体通過による位相差もさほどでていないことが分かる。

次に本試作システムの反応速度について述べる。人体装着側機器を装着した状態で、ドア設置側機器の電極に触れた。その結果、体感的ではあるが触れたとほぼ同時に認証状態を表す LED が点灯した。このことから、タッチ行為という非常に短い時間において、各機器間通信を行い、お互いを認証・ドア制御までを実行することができたといえる。

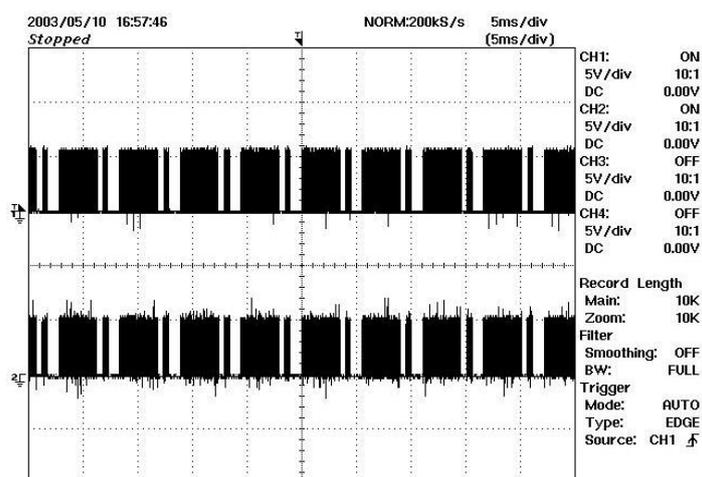


Fig.21 Comparison of transmitting (upper) and receiving (lower) signals

第7章 むすび

本論では、人体通信を用いることでユーザビリティ向上を目的として、ドアエントリーシステムを例にプロトタイプシステムを構築することで3つの問題解決を実証した。

第一に、4. 1・4. 2および5章において、人体通信をマンマシンインターフェースとして用いることを提案した。第6章より通信状態を使用者に対し意識させることができ、特別な道具なしに入出力が可能となった。

第二に、4. 4および5章において、ID信号伝達としてスペクトラム拡散通信を行う際にM系列信号を提案した。第6章により、小規模なユーザ条件において正しくID信号を認識することができ有効性を示すことができた。

最後に、4. 6および5章において、入出力インターフェースとして、アフォーダンスを活用することを提案した。第6章により、プロトタイプに対し特に学習なしに情報機器の扱い方を理解することができた。

以上3つの問題点の解決により、人体通信技術とアフォーダンスという理論との組み合わせにより、従来システムにおいてユーザビリティが向上するということが示せた。この成果によって、ドアエントリーシステムに限らず、情報機器における一層のユニバーサルデザイン化や、プラント施設や工場における目視や指差し安全点検による定量化などといったものも考えられる。この他にも、さまざまな分野において適用することができ、一層の発展が望める。

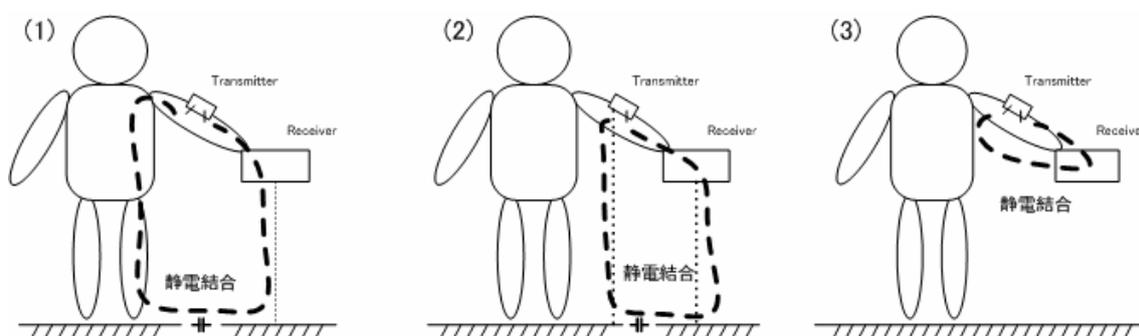
付録

A1. 人体通信方式

人体通信とは、人体を信号線の一部とし、大地アースと静電結合することで閉ループ回路を構成する。これにより、電気の流れが発生し通信を行うことができる。この通信は、大地アースの取りかたによって3つの手法が存在する。

方式(1)は、機器Bの基準線を大地アースに結び、機器Aの基準線から人体を經由して大地アースと静電結合してシステムの基準線を構成するものである。これにより、人体装着側装置の基準線と信号線を人体に接触させ、ドア設置側装置の信号線に使用者が触れることで、閉ループを構成し電気信号を伝達する方式である。この方式は、不安定な静電結合を利用する距離が短く、外部ノイズの影響を受けにくく、電極面積を小さくでき小型化が可能であり、装着の仕方に制約(方向性)あるという特徴を持つ。方式(2)は、機器Bの基準線を大地アースに結び、機器Aの基準線から空中を經由して大地アースと静電結合してシステムの基準線を構成するものである。これにより、人体装着側装置の信号線を人体に接触させ、ドア設置側装置の信号線に使用者が触れることで、閉ループを構成し電気信号を伝達する方式である。この方式は、不安定な静電結合を利用する距離が長く、外部ノイズの影響を受けやすく、電極面積を大きくする必要があり小型化が困難であるが、装着の仕方の自由度が高いという特徴がある。

方式(3)は、機器A・Bそれぞれの基準線・信号線を導波管の原理を利用して直接接続し、人体で静電結合させ閉ループを構成するものである。これにより、人体装着側装置の基準線と信号線を人体に接触させ、ドア設置側装置の基準線と信号線に接触することで閉ループを構成し、電気信号を伝達する方式である。この方式は、使用状況によって静電結合の強度が変化し不安定であり、人体側通信機と対象機器との距離を大きくできないという特徴がある。



A.1 Each system of the intrabody communication.

参考文献

第1章

- 1) Mark Weiser, the Computer for the 21st Century, Scientific American (International Edition), Vol.265, No.3, pp.66-75, 1991
- 2) 2003年度情報通信白書, 総務省, 2003
- 3) 佐々木正人, デザインすべきは「実在」にありーアフォーダンス理論への招待ー, 情処学 I M研報, No.16, pp.41-47, May 1994
- 4) Youichi Ikeda, Asako Kimura, Kosuke Sato, Handy Haptic Feedback Devices Simulating Tools' Affordance, TVRSJ, Vol.7, No.3, 2002
- 5) Chika SEKINE: Development by Design for Information Technology, Journal of the Japan society of Mechanical Engineering, Vol.105, No.1002, pp.321-324, 2002.
- 6) T. G. Zimmerman, Personal Area Networks: Near-field intrabody communication, IBM Systems Journal, Vol.35, No.3&4, pp.606-617, 1996.
- 7) Fukumoto MASAOKI, Tonomura YOSHINOBU: Wireless FingerRing: A body-coupled Wearable, Transactions of Information Processing Society of Japan, Vol.39, No.5, pp.1423-1430, 1998.

第2章

- 8) トランジスタ技術 SPECIAL No.8 特集 データ通信技術のすべて, CQ 出版社, 1988
- 9) 松下電工株式会社. 土井 謙之, 橋本 勝, 小山 正樹, 鈴木 佳子, 西村 篤久. データ通信装置. 特開 2001-223649. 2001-08-17
- 10) ソニー株式会社. 滝口 清昭. 通信方法及び通信装置. 特開 2004-266388. 2004-09-24
- 11) Keisuke HACHISUKA, Azusa NAKATA, Teruhito TAKEDA, Kenji SHIBA, Ken SASAKI, Hiroshi HOSAKA, Kiyoshi ITAO, Development of Devices for Communication through Human Bodies, Micromechatronics, Vol.46, No.2, pp.53-64, 2002.

第4章

- 12) Shinnosuke Yoshida, Kazuyuki Kobayashi, Kajiro Watanabe, Intuitive door entry system by using PAN, SICE Annual Conference 2004 in Sapporo August, pp.1974-1977, 2004
- 13) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz), Health Phys, Vol.74, No.4, pp.494-522, 1998.

第 5 章

14)microchip 社, PIC-16F84A Data sheet,

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/35007b.pdf>

15)microchip 社, MPLAB IDE v6.60

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MPLAB660.zip>

16)浅川毅, PIC アセンブラ入門, 東京電機大学出版局, 2001

17)後閑哲也, PIC プログラム入門, 技術評論社, 2002

18)白石義男, 図解アナログ IC のすべて, 東京電機大学出版局, 1986

19)白石義男, 図解デジタル IC のすべて, 東京電機大学出版局,1984

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究方針や研究内容についてご指導していただいた渡辺嘉二郎教授・小林一行教授両名に深く感謝申し上げます。

研究室に配属された4年次の頃より、3年間を通しての研究成果を、一つの形にまとめて上げていることを今、私は大きな達成感と共に迎えています。両氏のアドバイスにより、学部4年次・修士2年次においては、自律走行車競技会に出場させていただきました。そこでの経験は、私において高いモチベーションを維持できるキッカケにもなり、世界を相手に優勝できるという技術と自信を得ることができました。修士1・2年次においては、両氏のご指導のもと国内会議にて口頭発表をさせていただきました。ここでは、大勢の聴講者の前で発表し、多方面の方々から寄せられるアドバイスは、今後の研究における道標になると同時に、公の場で自らの研究成果を発表することは、大変貴重な経験でありました。このように、私が成長できる多くの機会を与えてくれたことに、深く感謝申し上げます。

また、研究生生活を通して、同じ渡辺研究室・小林研究室生の存在は私の支えになりました。安藤君・石川君・石垣君・大川さん・木島さん・小林君・松村さん・山本君らとは、ものごとに対する考え方や価値観を大いに討論し合う中で、お互いの意見や気持ちを尊重し理解し合えたこと、就職活動時においては、お互いに励ましあい高めあいつづけてきたことは、私にとってなにもものにも代えがたい貴重な思い出であり、個性を気付かせてくれる絶好の機会でありました。また、自律走行車競技会において、共に世界と戦った、雨宮さん・飯倉君・伊東君・今村君や、鍛えていただいた、伊藤先輩・小川先輩・石川先輩・富高先輩、私を支えてくれた森・宮崎を含む多くの後輩に対し、この経験で得た栄光や一体感は私の中で誇りであります。その他にも、榎本先輩・西谷先輩や私を知る多くの先輩・後輩・友人・知人たちと接することで、今の自分に成長できたのであると思う次第であります。改めて深く感謝申し上げます。

最後に、このような素晴らしく貴重な経験を、当たり前のようにさせていただいた両親に対し、最大限の感謝の気持ちと尊敬の念を持って本論と閉じさせていただきます。本当にありがとうございました。

2005年2月3日

研究成果

○ 国内会議

- Shinnosuke YOSHIDA, Kazuyuki KOBAYASHI, Kajiro WATANABE : Smart Touch Sensor, Annual Conference in Fukui August 4-6, 2003, pp.2216/2219

○ 国際会議

- Shinnosuke YOSHIDA, Kazuyuki KOBAYASHI, Kajiro WATANABE : Intuitive door entry system using PAN, Annual Conference in Sapporo August 4-6, 2004, pp.1442/1445