



平成24年度 修士論文

モバイルデバイスによる 被災者検索システム

電気通信大学 大学院情報システム学研究科

情報システム基盤学専攻

1153014 永井 智大

指導教員 鶴岡 行雄 教授
多田 好克 教授
新谷 隆彦 准教授

提出日 平成25年1月24日

目次

第 1 章	はじめに	6
第 2 章	既存技術	10
2.1	搜索救助	10
2.2	位置推定技術	11
2.3	雪崩ビーコン	13
2.4	無線省電力化技術	15
第 3 章	被災者搜索	21
3.1	大規模災害	21
3.2	被災者搜索システムの要求条件	21
第 4 章	予備実験	24
4.1	砂浜の場合	24
4.2	金属がれきの場合	25
4.3	屋内の場合	26
4.4	予備実験結果	27
第 5 章	提案システム	28
5.1	構成	28
5.2	搜索機能	29
5.2.1	搜索のフェーズ分け	29
5.2.2	発見フェーズ	31
5.2.3	発見フェーズの方式の前提	31
5.2.4	発見フェーズの設計	32

.....	
5.2.5 発見フェーズの間欠動作間隔の設定	35
5.2.6 ナビゲーションフェーズ	38
5.3 動作手順	38
5.4 利用シナリオ	45
5.4.1 災害直後の流れ	45
5.4.2 検索	45
第 6 章 評価	48
6.1 稼働時間の評価	48
6.2 被災者検索システムの評価	49
第 7 章 考察	51
7.1 複数の被災者の検索	51
7.2 省電力化	52
7.3 実装	52
第 8 章 おわりに	53
付録 A 実装	60
A.1 送信回路	60
A.1.1 回路設計	60
A.1.2 回路実装と問題	61
A.2 受信回路	63
A.2.1 回路実装	63
A.2.2 Android 端末との接続	64

図目次

2.1	集計用装置と各建物の被災者数情報の例 (文献 [6] より)	11
2.2	レスキューロボット (文献 [8] より)	11
2.3	ユーザの回転によるアクセスポイントへの方向推定 (文献 [19] より)	12
2.4	雪崩ビーコン	13
2.5	雪崩ビーコンの信号形式	15
2.6	雪崩ビーコンによるナビゲーション	16
2.7	S-MAC の動作	17
2.8	B-MAC の動作	19
2.9	X-MAC の動作	20
4.1	砂浜	25
4.2	金属がれき集積所	25
4.3	雪崩ビーコン設置場所	26
5.1	提案システムの構成	29
5.2	モード切り替え	29
5.3	探索のフェーズ切り替え	30
5.4	2 ノードの間欠動作	32
5.5	ナビゲーションフェーズへの移行	32
5.6	t_4 時間重ならない場合	33
5.7	必ず t_4 時間重なる動作	33
5.8	提案方式の動作	34
5.9	発見範囲がナビゲーション範囲より大きい場合	35
5.10	発見範囲がナビゲーション範囲より小さい場合	35

5.11	提案方式 1	37
5.12	提案方式 2	37
5.13	ナビゲーションフェーズの動作	38
5.14	モード遷移	39
5.15	通常モードのフローチャート	40
5.16	メッセージ A、B の内容	41
5.17	被検索モードのフローチャート	42
5.18	検索モードのフローチャート	43
5.19	メッセージ C の内容	44
5.20	1 人での検索	46
5.21	複数人での検索	47
A.1	送信回路 (文献 [31] を一部改変)	61
A.2	増幅回路	61
A.3	ブレッドボードによる実装	62
A.4	ユニバーサル基板による実装	63
A.5	バーアンテナ	64
A.6	IOIO	65

表 目 次

3.1 東京都昼間人口密度 (人/ km^2)(2010 年調査)(文献 [29] より一部抜粋)	22
6.1 稼働時間の比較	48

第 1 章

はじめに

震災等の大規模災害において、被災者救助は最も人的資源と時間を必要とする。各国とも山岳や海洋における被災者救助、および都市部における地震等の大規模災害における救助活動に対し、救助組織を構成している。例えば日本では警察による広域緊急救助部隊、消防による緊急消防援助隊が組織されている。また米国では国防省の FEMA (Federal Emergency Management Agency) が全米で 28 の FEMA Urban Search and Rescue Task Force を組織し、倒壊した建物の下敷きになった被災者の救助活動を行う。

しかし特に都市における大規模災害では、倒壊した建物の下敷きとなる被災者が同時多発的に発生するため、搜索救助を行う人の数が圧倒的に不足する問題が指摘されている。例えば都市圏の直下型地震であった阪神淡路大震災では、15 万戸以上の家屋が倒壊したことが知られている [1]。また阪神淡路大震災では住民の 19 %が一時的にしろがれきに閉じ込められたとされている [2]。そして大規模災害時は被災者を少しでも早く救助することで、より多くの人命が救えるとされている [3]。また被災者の生存率は災害発生 2 日目で大きく低下することが知られている [4]。そのため素早い搜索が必要となる。しかし救助隊が組織されて被災者の救助に駆けつけるまでには時間を要する。

また阪神淡路大震災では住民の 4 %ががれきに閉じ込められ自力で脱出できず他の人に助け出されたとされている。これを当時の兵庫県住民数に当てはめると自力で脱出できなかった人は 3.5 万人となる。また消防、警察、自衛隊の 3 者に

よって合計 7,900 人が救出されたことがわかっている。これらからその差約 2.7 万 (77.4%) が近所の住民らによって救出されたと考えられる [2]。このことから被災地において無事であった人が救助活動において重要な人的資源になり得ることがわかる。

都市での大規模地震は、マグニチュード 7 クラスの地震が首都圏直下でこれまで 100 年に 2~3 個の割合で発生してきたと考えられ、今後 30 年以内に首都圏で大地震が発生する確率は 70 %になると言われている [5]。さらに近畿地方においてもマグニチュード 8.4 クラスの南海地震が 2040 年から 2050 年に起こると予測されており、それまでもマグニチュード 7 クラスの直下型地震が 1~2 回起こる可能性が高いとされている [2]。これらより大規模災害時の被災者の素早い搜索が最重要課題となっており、救助隊の人的資源が限られていることから被災者搜索技術が重要となる。

また被災者はがれきや土砂に埋もれてしまい気絶したり全く身動きがとれないことが想定される。さらに災害発生後は携帯電話基地局等のネットワーク設備が利用できなくなる可能性も高い。そのため被災者自身が携帯電話により助けを求めるなどの行動をとることは難しい。

これに対し、搜索救助活動をサポートする技術として、建物内の被災者数を得るためのシステム [6] やがれき内の被災者の位置を特定するレーダー [7]、レスキューロボット [8, 9] などが数多く提案されている。しかしこれらの方法はあらかじめ建物内に専用機器を備え付けておく必要があるものや、搜索に大がかりな専用機器が必要になるものであり、救助隊でなければ用いることが難しい。

雪山登山では、雪崩災害発生時に被災者を搜索するための搜索機器として雪崩ビーコンが利用されている [10]。雪崩ビーコンは携帯電話より一回り大きい程度の端末であり、微弱な電波を利用して、ネットワーク設備を必要とすることなく搜索が行える。近年の雪崩ビーコンでは、搜索に関してもナビゲーションにより、搜索者を被災者の方向に導くことができ位置特定も容易である。また乾電池のみでの

長時間動作が可能となっている。しかし雪崩ビーコンは雪山登山者があらかじめ身につけることで検索が可能となるため、いつどこで発生するか予測が困難な震災や土砂災害時においては被災者があらかじめ専用機器を身につけることを仮定することは難しい。よって震災等において専用機器を用いることなく迅速かつ容易に被災者を検索するシステムの実現が課題となっている。

そこで本研究では人々が普段携帯する携帯電話やスマートフォンなどのモバイルデバイスに被災者検索機能を搭載することにより、専用機器を用いることなく被災者を検索するシステムを提案する。提案システムでは被災者の家族など被災地において無事ですぐに対応可能な者が検索を行うことで迅速な対応が可能となる。

被災者検索システムではネットワーク設備が利用できないことを想定し、ネットワーク設備に依存しない検索方法が望ましい。また一般の人が検索を行うことから、容易に被災者の場所を特定できる必要がある。そこで提案システムでは、検索方法として雪崩ビーコンの検索機能を用いる。雪崩ビーコンの検索機能はネットワーク設備を必要としない。そして雪崩ビーコンの検索機能はナビゲーション性能が優れており、スキルを持たない一般の人でも容易に検索が行える。また災害時においてはがれきや土砂に埋もれてしまった被災者の持つ端末を充電することは不可能となり、電力設備が機能しなくなる可能性もある。しかし雪崩ビーコンの検索機能は、携帯電話等に搭載しているバッテリーの容量を考えると電力消費量が多い。また被災者数が数十人規模の場合は想定されていないため信号重複による検索性能の低下といった問題も発生する。

そのため提案システムでは、十分な検索時間確保のための省電力化と信号の重複回避のために、検索機能を2つのフェーズに分ける。1つ目は被災者端末の存在を発見するため発見フェーズで、2つ目がナビゲーションによる検索を行う検索フェーズである。発見フェーズで通信動作を間欠的に行うことで省電力化と信号の重複回避を実現する。

第2章以降、被災地にいる人々を被災地住民、がれきや土砂に埋もれてしまった

人々を被災者、被災者を探す者を捜索者と呼ぶ。本論文の構成を以下に示す。第2章では捜索救助技術など本研究に関連する既存技術を紹介する。第3章では大規模災害時の被災者捜索の要求について述べ、第4章では提案システムの捜索機能として用いる雪崩ビーコンの捜索性能の有効性を確かめるために行った予備実験について紹介する。第5章では提案システムについて述べ、第6章で提案システムの評価方法、さらなる省電力化や、小型化について考察する。第7章では本研究の結論を述べる。

第 2 章

既存技術

2.1 搜索救助

本節では人間や情報端末の位置を知るための既存の技術として、災害時に用いるための搜索救助技術について述べる。

災害を想定した被災者の位置推定技術としてレーダーを用いる方法 [7] などが知られている。レーダーではがれき等に埋もれた被災者の位置を、被災者の呼吸などによる身体の動きを感知することで推定する。多くの場合 10kg 以上ある大きな機器である。また被災者搜索活動をサポートするシステムとして、各建物に残された被災者の数を被災者の携帯電話の Bluetooth を用いて集計し救助隊に伝えるシステム [6](図 2.1) などがある。このシステムではあらかじめ建物内に専用機器を配置しておくことで、震災等の災害発生時に各建物の被災者数を集計する。この情報を救助隊が搜索活動に活用する。

その他の被災者搜索技術としてはレスキューロボット (図 2.2) によるものも多く提案されている [8, 9]。レスキューロボットは救助活動の質や速度の向上や、二次災害遭遇の防止、人間には不可能な救助機能の実現を目的としている。多くの場合レスキューロボットはカメラやサーモビジョン、ガス濃度センサなどのセンサ機器を搭載し、がれきのすき間を進みながらがれき内の被災者の場所の特定を行う。がれきの種類やすき間の大きさに応じて様々なものが提案されている。また発見した被災者を伸縮式のベッドに乗せて救助も行う火災現場を想定した大きな物も

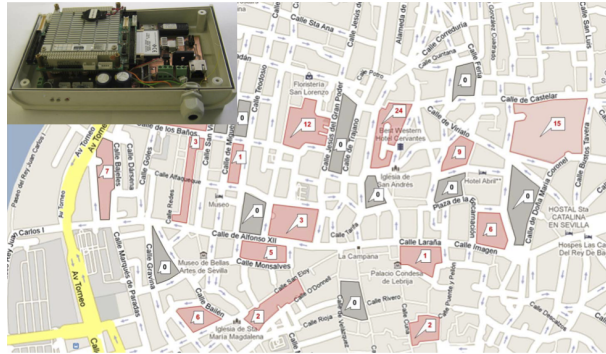


図 2.1: 集計用装置と各建物の被災者数情報の例 (文献 [6] より)

ある。しかしこれらは救助隊が用いることを前提とした特別な機器を必要とする。そのため被災地住民による搜索を前提とした場合、これらの技術を利用することはできない。



図 2.2: レスキューロボット (文献 [8] より)

2.2 位置推定技術

次に情報端末の位置を知るための技術として、既存の位置推定技術について紹介する。既存の位置推定の多くは一般向けの端末を想定しており、ISMバンド (2.4GHz 帯) を用いる IEEE802.11b/g や ZigBeeなどを想定したものが多い。

それらは基本的に複数の位置基準点 (アクセスポイントなど) から無線電波強度の測定を行い、距離を推定した上で誤差最小となる地点を推測することで自身の位置を得る [12]。また屋内では建物構造の複雑さによる反射などにより電波強度からの距離の推定が正確に行えないため、電波マップを事前に学習することにより、それとのマッチングを行う方法も提案されている [13, 14]。また高精度な位置推定を目的とし、超音波と無線の到達時間差を利用した距離推定方法もある [15]。スマートフォンのマイクとスピーカーのみを用いて、スマートフォン間の正確な距離を測定する技術もある [16]。その他に GPS を用いた搜索 [17, 18] も提案されている。

また静止したアクセスポイントの位置を特定する技術として、ユーザが端末を持ったまま回転することで、ユーザ自身が障害物となることによる電波強度の変化を元に方向を推定する手法も提案されている [19]。この手法では方向を推定した後一定距離進み、再び方向推定を行うことを繰り返しながら目的のアクセスポイントの位置を特定する。図 2.3 の左がユーザの回転の例で、右が実験結果である。

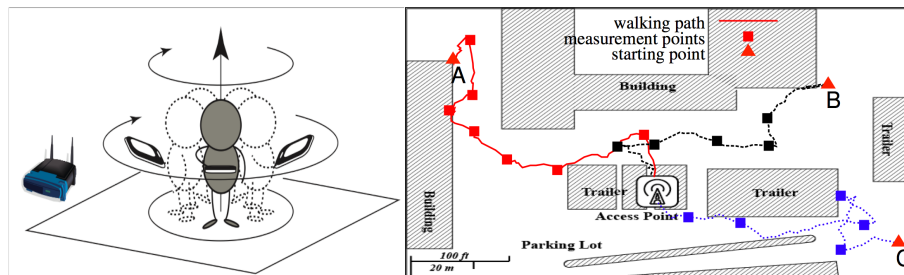


図 2.3: ユーザの回転によるアクセスポイントへの方向推定 (文献 [19] より)

しかしこれらは大規模災害によるがれきや土砂に埋もれた被災者の搜索といった状況は想定していない。そのため障害物の多いこれらの環境では利用が不可能であることや精度の低下が予測される。

またこれらの位置推定技術の多くは、移動を繰り返しながら測定を行い搜索対象の位置へたどり着くといった用途は想定していない。そのため位置推定を行った

対象へ近づくには何らかの搜索手順を実現する必要がある。また搜索者を適切な場所に導くためには、絶対的位置座標 (緯度経度) よりも被災者がどちらの方向にいるのかといった相対的位置の情報がより重要となる。そのような相対的位置情報を用いて搜索を助ける技術として、雪山登山時などの雪崩災害を想定して用いられる雪崩ビーコン [10] がある。雪崩ビーコンは専用機器を必要とするが、搜索者と被災者の相対的な位置関係により搜索者を被災者のところへ導く情報を提示するナビゲーション技術として優れている。

2.3 雪崩ビーコン



右 : MAMMUT PULSE Barryvox

図 2.4: 雪崩ビーコン

雪崩ビーコンとは、雪山登山者が複数人で登山する時に各自携帯するものである。図 2.4 に雪崩ビーコンの写真を示す。左側の端末は比較のための Android 端末 Nexus S である。雪崩ビーコンには信号を送信する送信モードと信号を受信する受信モードがある。受信モードはビーコン信号を受信することにより被災者を発見

するために用いる。送信モードはビーコン信号を送信することにより捜索者に発見してもらうためのものである。また雪崩ビーコンは送受信を同時にすることはできない。登山開始時には全員の雪崩ビーコンを送信モードにする。登山中に雪崩が発生し被災者が出た際に、無事だった者が雪崩ビーコンを受信モードに切り替え被災者の捜索を行う。

雪崩ビーコンの仕様についてはETSI (European Telecommunications Standards Institute) の Radio Equipment and systems (RES); Avalanche Beacons; Transmitter-receiver system[10] で定められている。信号には 457kHz が使用される。変調方式は A1A で、周期 t_1 は $0.9\text{s} \pm 0.4\text{s}$ で、信号のオンの時間 t_2 は最低 70ms、オフの時間 $t_1 - t_2$ は最低 200ms となるように規定されている (図 2.5)。バッテリーについては、登山開始から終了までの間送信し続けることを想定し、送信モードで最低 200 時間動作するように規定されている。

雪崩ビーコンを用いた捜索について、雪崩ビーコンの一つである MAMMUT PULSE Barryvox[11] の場合で説明する。捜索に用いる受信モードでは被災者 (送信モードの端末) までの方向と距離が表示される。方向や距離は図 2.6 中左上のように、雪崩ビーコンの画面上に矢印と数値で表示される。この場合は矢印の方向に 8.3m 進むと送信モードとなっている雪崩ビーコンがあることを示している。

方向の取得については、雪崩ビーコンでは図 2.6 に示すような磁力線が出ておりそれに沿った方向となる。そのため被災者への最短の方向とは限らないが、その方向へ進むことで被災者の場所までたどり着くことができる。また距離の取得は受信した信号の強度により算出する。受信信号強度については、端末から出される音の大きさでも知ることができる。ユーザインターフェースについては雪崩ビーコンの機種によって若干異なる。

捜索者が被災者を捜索する手順を以下に示す。

1. 被災者の雪崩ビーコンの信号を受信できる場所まで移動する
2. 捜索者の雪崩ビーコンの表示を確認し、矢印の方向へ進む

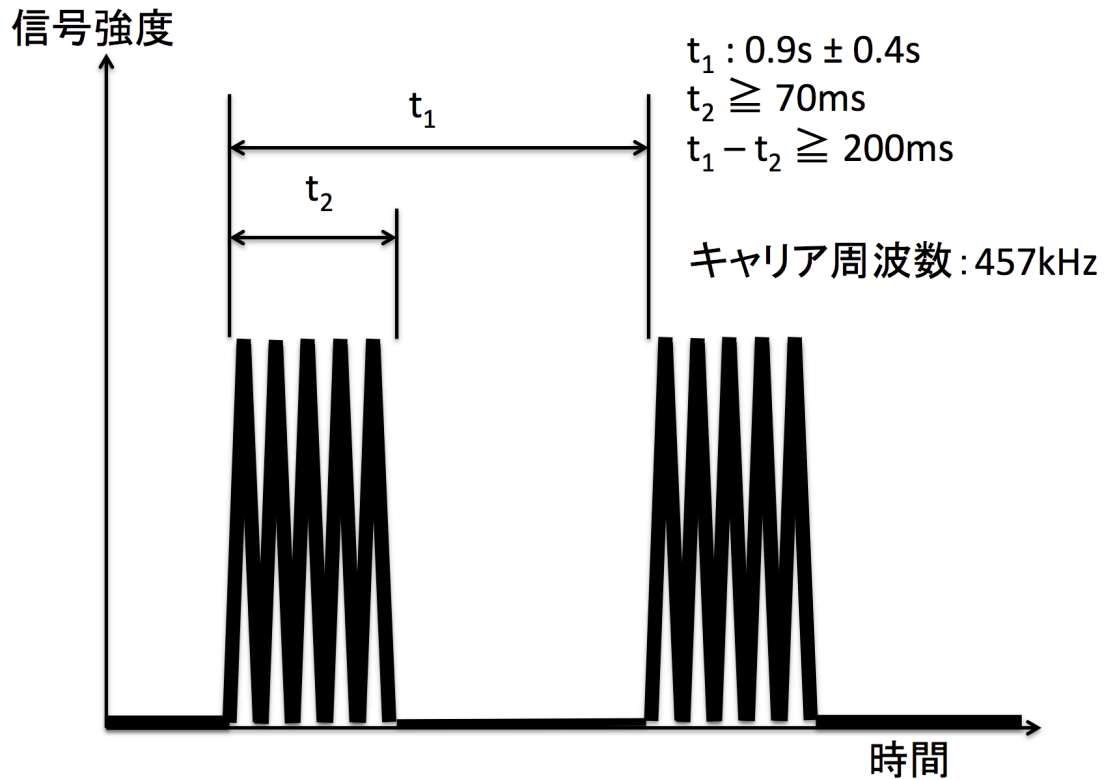


図 2.5: 雪崩ビーコンの信号形式

3. 信号が強い位置まで移動する
4. ある程度信号が強い場所まで移動したら、雪面に捜索者の雪崩ビーコンを近づけ信号が一番大きい場所をピンポイントで探す
5. 場所を特定できたらスコップ等で被災者を掘り出す
6. すべての被災者を発見できるまで (1) から (5) を繰り返す

2.4 無線省電力化技術

災害によりがれきや土砂に埋もれてしまった被災者の端末は充電を行うことが不可能となる。また大規模災害時には電力設備が機能しなくなってしまう

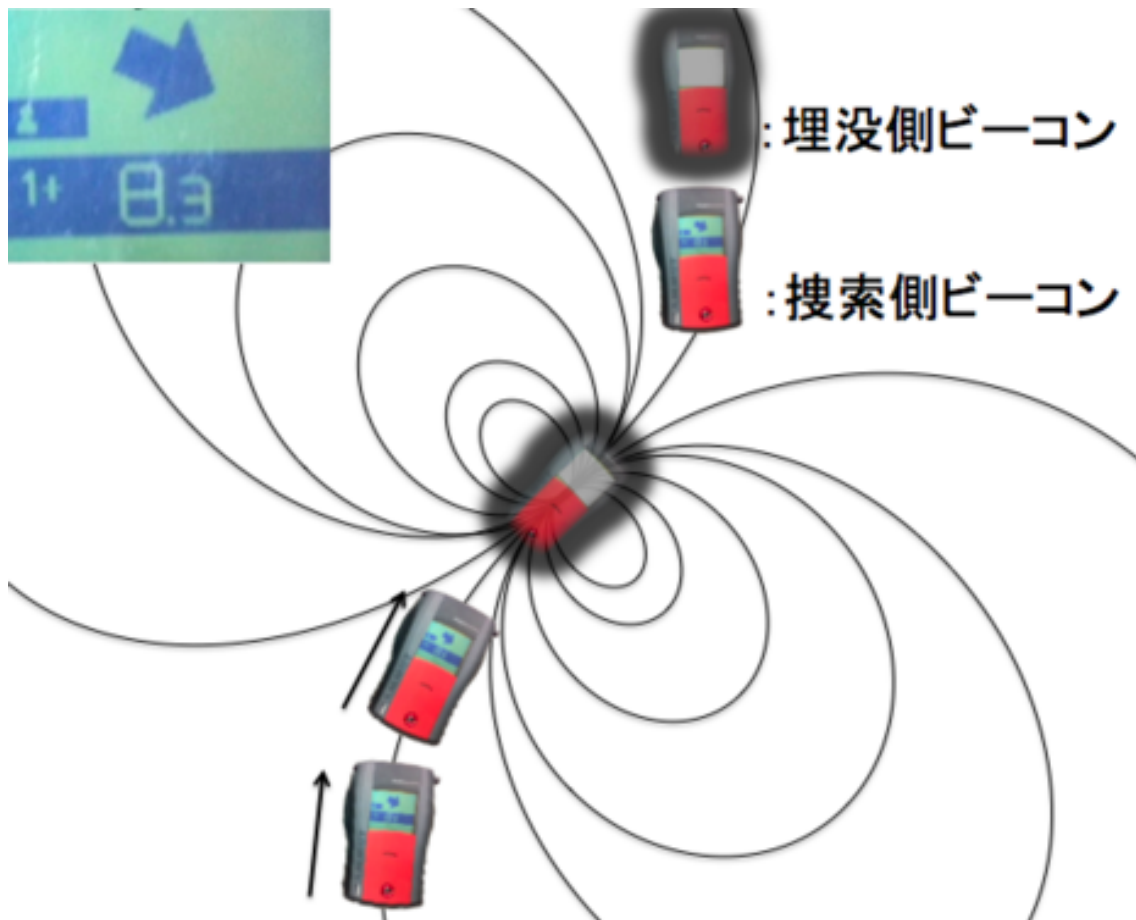


図 2.6: 雪崩ビーコンによるナビゲーション

可能性もある。そのため災害時の搜索技術においては省電力化が重要となる。

同様にセンサネットワークにおいても設置を容易にするためにバッテリー駆動させることが重要であり、そのための省電力化技術の研究が多く行われている。またセンサネットワークのセンサノードとルータノードの関係が災害時の被災者と搜索者に近いと考えられる。本研究では搜索機能における省電力化を行うことを考え、これらの技術について調査を行った。本節ではそれらを紹介する。

センサネットワークにおける省電力化手法としては、一部のノードに通信が集中しないよう効率的なルーティングを行う方法や MAC 層レベルで無線回路を制御することで無駄なアクティブ時間を減らす方法などがある。ルーティング方式には

GPS や無線電波強度により得られる位置情報を用いる方式 [20] や、センサネットワーク上にツリー上の経路を構築しルーティングを行う方式 [21] がある。

また MAC 層レベルでの省電力化方式では、無線回路のアクティブ状態とスリープ状態を効率良く切り替えることで省電力を実現している。MAC 層レベル省電力化方式は大きく分けてスリープのスケジュールを同期させる同期型と、スリープスケジュールの同期をとらない非同期型がある。

同期型の代表的な方式には S-MAC[22] や T-MAC[23] などがある。S-MAC では無線回路のアクティブとスリープを周期的に繰り返す。この周期的なアクティブの時にデータの送受信を行う。アクティブ期間の始めにこのスリープのスケジュールを近隣のノードと交換することで周期を同期させる。またデータ通信が行われない場合でも決められたアクティブ時間だけアクティブでいなければいけないため無駄なアクティブが発生してしまう。S-MAC の簡単な動作を図 2.7 に示す。図は初めに同期パケットを送受信した後受信ノードは間欠動作し、送信ノードがデータ送信が必要になった際はそれに合わせデータを送信している様子を示している。

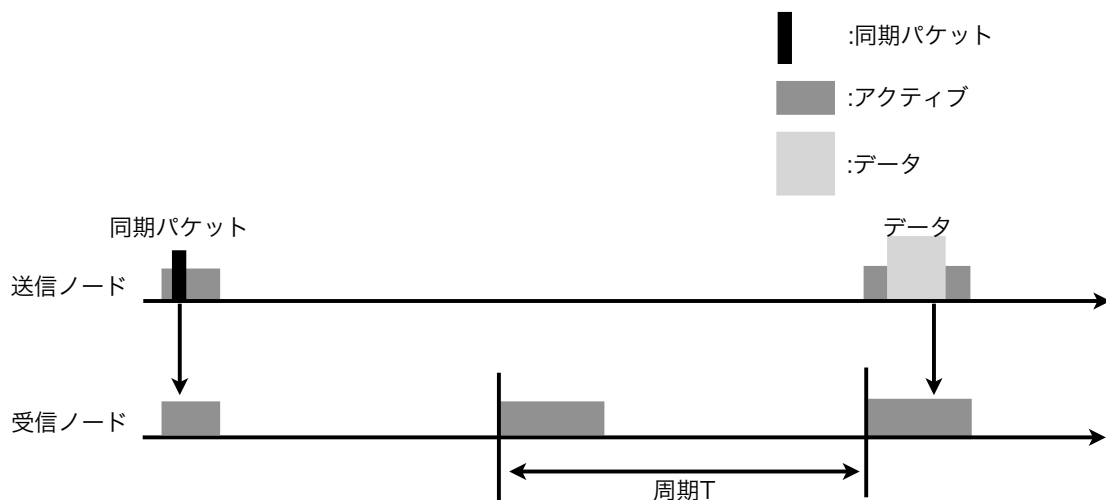


図 2.7: S-MAC の動作

T-MAC は S-MAC を改良し、データ通信が行われない場合アクティブの時間が短くなるようにしている。T-MAC ではアクティブ期間のはじめのスケジュール交換のための期間の後に、無線通信の使用状況を確認し受信データがない場合すぐにスリープに戻る。受信データがある場合はアクティブ時間が終わるまでアクティブでいる。これにより T-MAC は S-MAC と比べて省電力を実現している。また同期型ではノード間のスケジュールの交換による同期を必要とするため大規模なセンサネットワークでの利用に課題がある。

次に非同期方式について述べる。非同期型の代表的な方式には B-MAC[24] や X-MAC[25] などがある。非同期方式も同期型と同様にノードはアクティブとスリープの二つの状態を周期的に繰り返す。しかし同期型と異なりノード間でのスリープのスケジュールの同期は行わず、ノードごとに独立したスケジュールで動作する。B-MAC は送信を行うノードは受信側のスリープ時間よりも少し長いプリアンプルをつけてデータの送信を行う。受信側ノードはアクティブ中にプリアンプルを発見した場合そのままデータを待つ。B-MAC の簡単な動作を図 2.8 に示す。信ノードは周期 T で間欠動作をしており、送信ノードはデータ送信が必要になった場合 T 以上のプリアンプルをつけ送信し、受信ノードがアクティブの際にプリアンプルを受信するとそのままデータが受信されるまで待機する。B-MAC では送信の際、送信対象のノード以外のノードもアクティブ状態を維持してしまうことや、必ずスリープ時間以上のプリアンプルの送信が必要なことによる電力の消費が課題となっている。

X-MAC では送信側ノードは受信側の ID を含んだ短いウェイクアップ要求パケットを連続で送信する。受信側のノードはアクティブ時に自身を対象としたウェイクアップ要求を受信するとウェイクアップ応答パケットを返す。その後送信側ノードはデータの送信を開始する。自身を対象としていないウェイクアップ要求を受信した場合は無視しスリープに戻る。これにより B-MAC の送信対象のノード以外がアクティブ状態を維持してしまうことと、送信のたびに必ず長いプリアンプルを

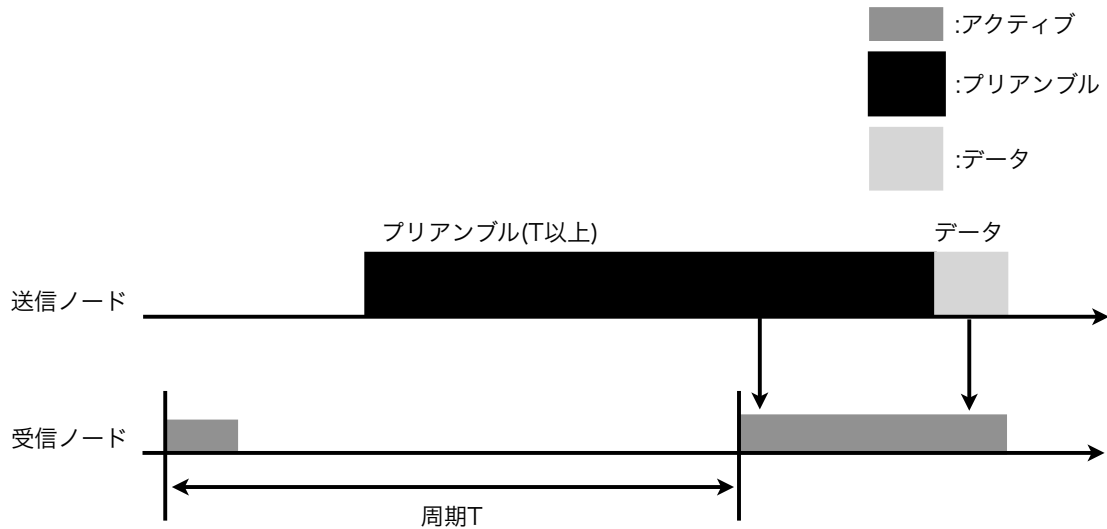


図 2.8: B-MAC の動作

必要とする問題を解決している。X-MAC の簡単な動作を図 2.9 に示す。図は受信ノードは周期 T で間欠動作しており、送信ノードはデータ送信が必要になった場合、まずウェイクアップ要求を送信し、受信ノードがそれを受信し応答を返してから、データを送信している様子を示している。

同期型、非同期型の他に、ノード数が増加すると同期型から非同期型へ動作を変更するハイブリッド型と呼ばれるもの [26] もある。

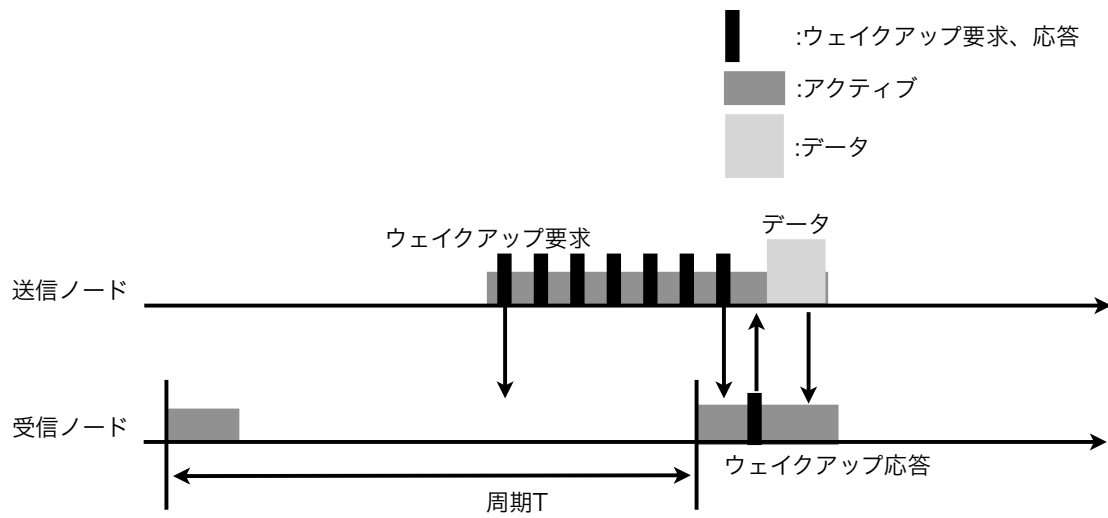


図 2.9: X-MAC の動作

第 3 章

被災者搜索

3.1 大規模災害

本章では被災者搜索の要求条件について述べる。阪神淡路大震災では救出者の生存率は2日目で大きく低下し、4日目を境にさらに大きく低下している [4]。また震災等の大規模災害が発生した際は多くの場合で同時に複数の被災者が出る。世界的に見ても人口密度が高く、大規模な震災発生危険性も高いと考えられる東京 23 区の場合、2010 年度の昼間人口密度は $18,905.7 \text{ 人}/\text{km}^2$ であり、一番多い千代田区で $75,017.6 \text{ 人}/\text{km}^2$ である (表 3.1)[29]。

また都市圏での大規模震災である阪神淡路大震災では住民の 4% ががれきに閉じ込められ自力で脱出できなかったとされている [2]。これらから、本研究では想定される最大被災者密度を人口密度のうちの自力で脱出できない人と考え、約 $3,000 \text{ 人}/\text{km}^2$ と想定した。

3.2 被災者搜索システムの要求条件

本節では被災地住民が用いることを前提とした被災者搜索システムにおける要求条件について述べる。

まず震災等の大規模な災害時においては携帯電話基地局等のネットワーク設備が利用できなくなる可能性が高い。そのため被災者搜索システムはネットワーク

表 3.1: 東京都昼間人口密度 (人/ km^2)(2010 年調査)(文献 [29] より一部抜粋)

	2005	2010	2015(予想)
東京都	6,846.4	7,123.6	7,152.0
区部	18,143.2	18,905.7	18,961.3
千代田区	73,314.6	75,017.6	73,966.5
中央区	63,628.0	64,399.9	63,661.0
港区	44,687.3	47,488.0	47,916.7
新宿区	42,243.2	43,159.2	42,612.5
文京区	29,728.5	30,579.0	30,695.7
:	:	:	:

設備に依存しないようにする必要がある。また被災者ががれき等に埋もれてしまい身動きがとれないことが想定されるため、被災者は機器の操作が必要ないようにする。そして救助隊や専用機器を待つことなく迅速な搜索を可能とすることで多くの被災者を救助することが可能となる。最後に、利用にスキルを要する技術は災害時に使われない可能性があることから、一般の被災地住民が容易に利用できる必要がある。

また搜索機能の要求条件としては稼働時間が挙げられる。稼働時間はがれき災害では1日以内の素早い搜索が必要とされているが、災害発生から1週間以上経過してから生存者が発見された例もあることや、十分な搜索時間の確保を考え、1週間強の最低 200 時間とする。

被災者搜索活動全体の要求条件を以下にまとめる。

- ネットワーク設備に依存しない
- 被災者が機器の操作を必要としない
- 救助隊を待つことなく迅速な検索が可能
- 一般の被災地住民が容易に利用できる
- 十分な稼働時間 (200 時間)

第 4 章

予備実験

雪崩ビーコンのナビゲーションによる検索機能が優れていることから、本研究では雪崩ビーコンをがれきや土砂に埋もれた被災者の検索に応用する。しかし雪の場合とがれきなどの場合では電波伝搬の状況が異なる。また雪崩ビーコンでは雪以外の場合を想定していない。そのためがれきや砂、屋内の場合についての雪崩ビーコンの有効性を確認するために実験を行った。

実験は市販の雪崩ビーコンの Ortovox M1 と MAMMUT PULSE Barryvox を用いて行った。片方の雪崩ビーコンを送信モードで砂やがれきの中、机の下などに置き、もう一方の雪崩ビーコンで検索する形で実験を行った。

4.1 砂浜の場合

土砂災害などでの雪崩ビーコンの検索機能の有効性を確認するために砂浜での検索実験を行った。実験は神奈川県藤沢市の砂浜 (図 4.1) で行った。

検索側と埋めた側については Ortovox M1 と Barryvox を入れ替え、かつ埋める場所を変え、それぞれ 5 回検索を行った。

実験の結果、全ての場合で雪の場合と同様の時間で発見することができた。また操作性についても雪の場合と同様であった。これにより雪崩ビーコンは砂の中でも十分機能することがわかり、土砂災害でも十分有効であると考えられる。



図 4.1: 砂浜

4.2 金属がれきの場合

がれきでの実験は、信号の反射の影響が大きいと考えられる金属がれきの集積所(図 4.2)で行った。



図 4.2: 金属がれき集積所

一方の雪崩ビーコンをがれきの中に置き、がれきの山の反対側から搜索を行うかたちで実験を行った。がれきの中に置く雪崩ビーコンの位置と搜索開始場所を変えながら合計 10 回搜索を行った。

実験の結果、全てで発見することができた。方向については若干のズレが生じることがあったが、おおよそ正しい方向を示していた。距離については図 4.3 のようなトタンの間のような特に反射の影響が大きいと考えられる場所であってもほぼ正確な値を示し、近づくにつれて受信音も近付いていることを示していた。



図 4.3: 雪崩ビーコン設置場所

これらにより、雪崩ビーコンはがれきに埋もれてしまった人の搜索でも十分に使用できることがわかった。

4.3 屋内の場合

屋内での実験は電気通信大学内の会議室で行った。実験は一方の雪崩ビーコンを机の下など室内の様々な場所に置き、もう一方で搜索を行った。雪崩ビーコンの設置場所を変え 5 回搜索を行った。

.....

実験の結果、全てで発見することはできたが、方向については正確に得ることは出来なかった。これは屋内の場合、反射の影響が大きいためだと考えられる。しかし移動にともなう受信信号強度 (画面上に表示される距離) の変化により検索は可能であった。

4.4 予備実験結果

以上の結果により、雪崩ビーコンは雪崩災害だけでなく土砂災害やがれき災害の場合でも有効に利用できることがわかった。屋内においても信号強度により距離を得ることができ検索を行うことは可能であった。

第 5 章

提案システム

5.1 構成

本研究では震災等の大規模災害時の被災者検索システムとして、一般の人々が日常的に用いる携帯電話に被災者検索機能を搭載することを目指す。被災者検索機能は利用に特別なスキルを必要としないものとする。

提案システムは被災者検索機能を持った複数の携帯電話からなる。本システムでは一般の人々が自身で所持している携帯電話により検索活動を行える。提案システムでは携帯電話は普段は通常の携帯電話機能で動作する通常モードであり、災害が発生した際に被災者検索機能に切り替える。搜索者と被災者で同じ端末を用い、モードを切り替えることでそれぞれの機能を使用する。搜索では搜索者は被災地を歩きながら被災者の存在を探す。被災者検索機能には、生成する磁界により被災者の方向を直接知ることができる雪崩ビーコンの搜索方式を用いる。図 5.1 は災害が発生し、2 人の被災者と 2 人の搜索者がいる状態である。がれき等に埋もれてしまった被災者の端末は被搜索モードとなり、搜索者の端末は搜索モードとなる (図 5.2)。搜索モードは雪崩ビーコンにおける受信モード、被搜索モードは送信モードにそれぞれ相当する。なおモードの切り替えについては 5.3 で改めて説明する。

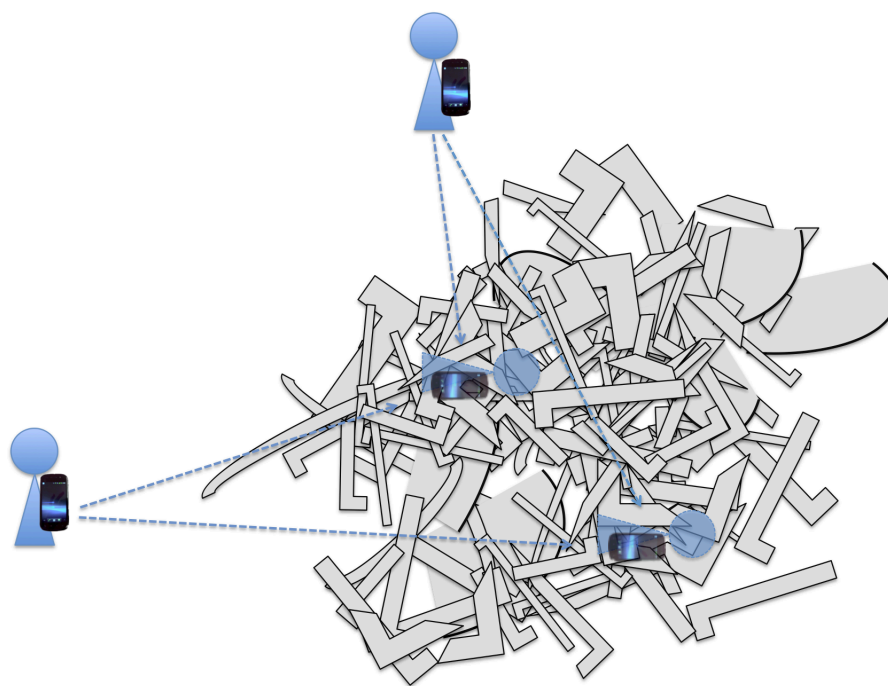


図 5.1: 提案システムの構成

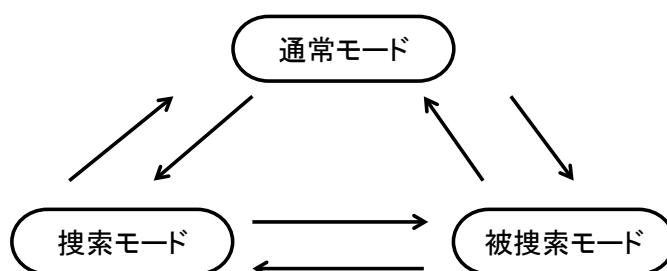


図 5.2: モード切り替え

5.2 検索機能

5.2.1 検索のフェーズ分け

提案システムでは被災者検索機能としてナビゲーション性能の優れた雪崩ビーコンの検索機能を用いる。しかし雪崩ビーコンのバッテリー容量が約18Wh(MAMMUT

PULSE Baryyvox の場合) であるのに対し携帯電話は約 7Wh(Galaxy S II LTE の場合) であり約 2.5 倍の差があるため、省電力化が課題となる。本研究では十分な搜索時間を確保するために、被災者端末の稼働時間を 200 時間 (1 週間強) 確保する。被災者端末の稼働時間を考えるのは、被災者端末は被災後は充電が不可能で基本的に 1 人に対し 1 台のみであることに對し、搜索端末は被災地住民のどの端末でも良いことから、被搜索端末の省電力化が特に重要なためである。また搜索端末は電力設備の復旧の状況によっては充電ができることが考えられるためでもある。また雪崩ビーコンでは被災者数は 4、5 人程度までしか想定されておらず、被災者数が数十人になると信号の重複による搜索性能の低下がおこる [30]。

そこで提案システムの搜索機能では、雪崩ビーコンの搜索方式のナビゲーションフェーズと、その前段階の発見フェーズに分ける (図 5.3)。発見フェーズは被災者が近くに存在するかを探すフェーズである。そしてナビゲーションフェーズは、ナビゲーションにより発見フェーズで発見した被災者の場所まで向かい、被災者の位置を特定するフェーズである。次節以降で、発見フェーズの動作を詳しく説明する。

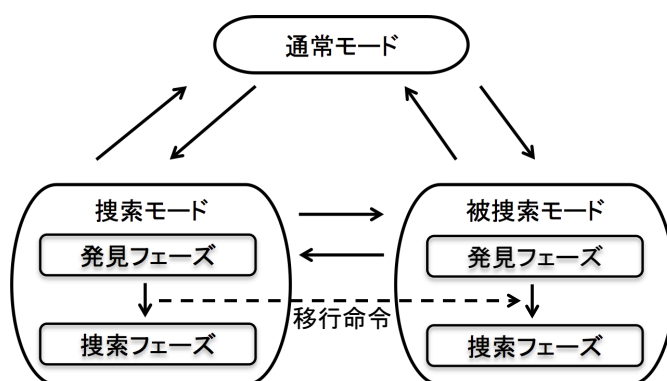


図 5.3: 搜索のフェーズ切り替え

5.2.2 発見フェーズ

発見フェーズでの動作は無線センサネットワークのために提案されている MAC プロトコル [24, 25] を参考に設計した。これは無線センサネットワークで想定されている環境と本研究が想定している環境が似ているためである。そして無線センサネットワーク向けの MAC プロトコルの多くで用いられている通信モジュールの間欠動作は、提案システムでの発見動作に適している。

5.2.3 発見フェーズの方式の前提

搜索者端末と被災者端末の二つの端末での通信について考える。それぞれの端末には送信と受信と通信を行わないスリープ状態がある。受信待受については受信と消費電力が同じことから受信に含んでいる。ここでは被災者端末が送信し、搜索者端末が受信する。端末は省電力化のため送受信とスリープを間欠的に繰り返す。搜索者端末の受信間隔を t_1 、搜索者端末の受信時間を t_2 、被災者端末の送信間隔を t_3 、被災者端末の送信時間を t_4 とする。

被災者端末から搜索者端末に送られる信号を発見信号、それに対する搜索者端末の応答をナビゲーションフェーズ移行信号と呼ぶ。これらの信号は雪崩ビーコンの搜索方式と同様の電波を用い、AM 変調することにより ID を送信する。搜索者端末と被災者端末の2端末の間欠動作を図 5.4 に示す。またナビゲーションフェーズ移行信号を送受信することでナビゲーションフェーズに移行する (図 5.5)。

2 端末の送受信状態が通信に必要な最低時間 T_{min} 以上重なっている場合、通信は成功するものとする。また適用システムにおける通信成功までにかかる時間の許容値を T_{dmax} とする。

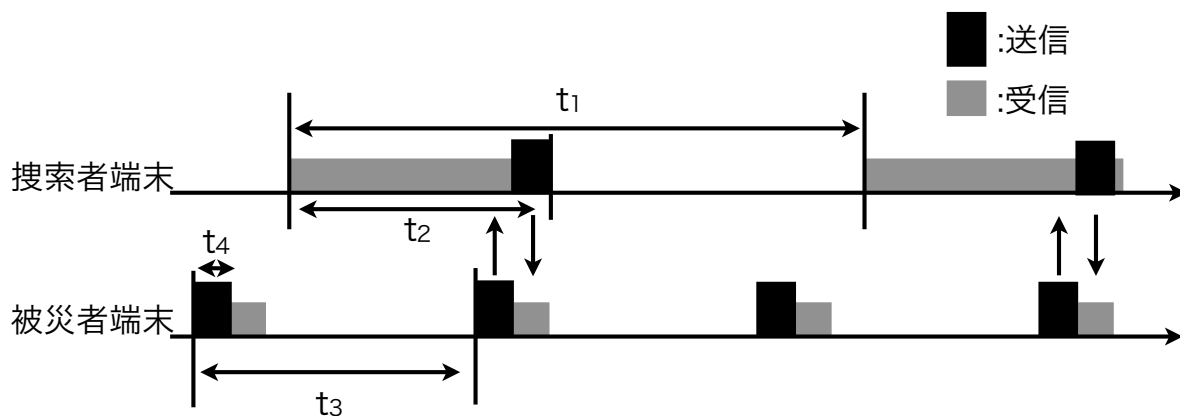


図 5.4: 2 ノードの間欠動作

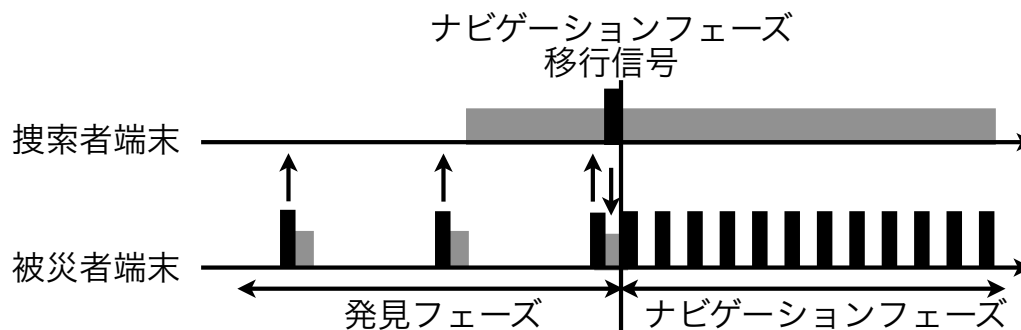


図 5.5: ナビゲーションフェーズへの移行

5.2.4 発見フェーズの設計

本研究の発見フェーズでは搜索者端末の一回の受信間隔 t_1 で通信を成立させることを考える。よって $t_1 \leq T_{dmax}$ である必要がある。消費電力を考えると少しでも受信間隔が長い方が良くことから $t_1 = T_{dmax}$ とする。また通信を成立させるためには一回の t_2 の間に t_4 が重なり、その重なっている時間は T_{min} 以上である必要がある。消費電力を考えると t_4 は少しでも小さい方が良くことから $t_4 = T_{min}$ と

する。

搜索者端末の受信動作の間に被災者端末が必ず送信するためには、搜索者端末の受信時間 t_2 は被災者端末の送信間隔 t_3 以上である必要がある ($t_2 \geq t_3$)。さらに送受信は T_{min} 時間重ならないけれども、 $t_3 = t_2$ では図 5.6 の様にタイミングが悪いと t_2 の前後に t_4 がはみ出してしまう。これは t_2 を t_4 以上長くするか、 t_3 を t_4 以上短くするか、合計 t_4 以上 t_2 を長く t_3 を短くすることで回避できる。ここでは $t_2 = t_3 + t_4$ とする (図 5.7)。

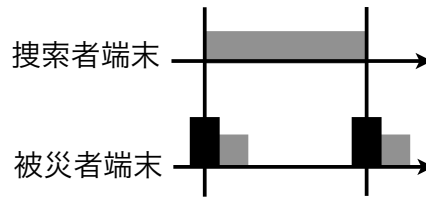


図 5.6: t_4 時間重ならない場合

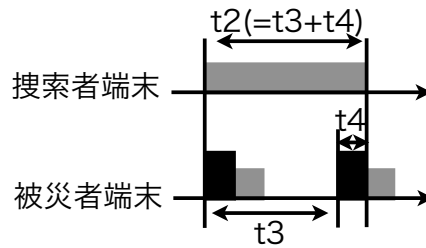


図 5.7: 必ず t_4 時間重なる動作

提案方式の動作を図 5.8 に示す。この方式では T_{dmax} と T_{min} が一意とすると、 t_3 を決めることですべてのパラメータが決まる。この時 t_3 が大きいと全体のうちの被災者端末の送信時間が占める割合が減り、 t_3 が小さいと搜索者端末の受信時間が占める割合が減る。従って搜索者端末と被災者端末の消費電力は t_3 をパラメー

タとして変わり、それらはトレードオフの関係にある。

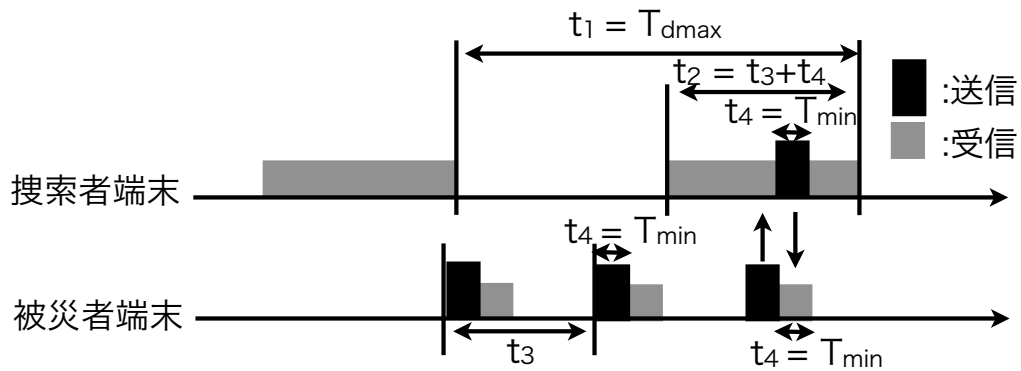


図 5.8: 提案方式の動作

また発見フェーズの設計の上では発見範囲と T_{dmax} 、 T_{min} を考える必要がある発見範囲は発見信号の到達距離を半径とした円である。またナビゲーション信号の到達距離を半径とした円をナビゲーション範囲と呼ぶ。

ナビゲーション信号の到達距離は雪崩ビーコンの仕様と同じ 50m であり、発見信号の到達距離もこれに合わせ 50m とする。発見範囲がナビゲーション範囲より広いと、ナビゲーションが使えない位置で発見が行われてしまう (図 5.9)。また発見範囲がナビゲーション範囲より狭いとその分無駄になってしまう (図 5.10)。

T_{dmax} を大きくすると消費電力は削減できるが、発見せずに通り過ぎることや発見の遅れにつながってしまう。そこで徒歩で搜索を行うとして最大分速を 80m とすると、発見信号の到達距離 50m より、 $T_{dmax} \leq 37.5\text{sec}$ とすることで被災者を取りこぼすことなく発見が行える。提案システムでは余裕を持たせ、 $T_{dmax} = 30\text{sec}$ とする。30sec で歩く距離は 40m であり、発見信号の到達距離が 50m であることから取りこぼすことなく発見できる。 T_{min} に関しては雪崩ビーコンの仕様の最低値と同様の 70msec とする。

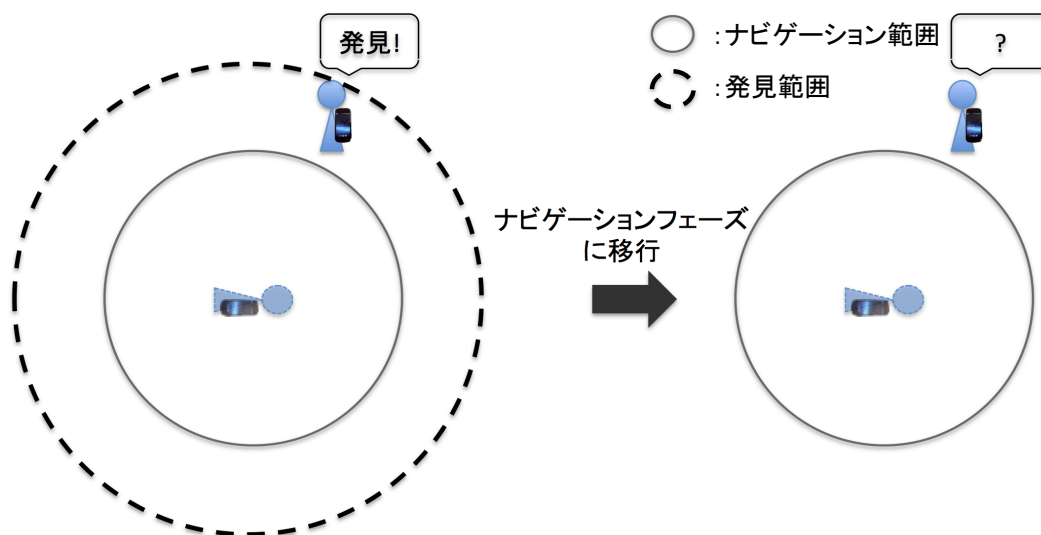


図 5.9: 発見範囲がナビゲーション範囲より大きい場合

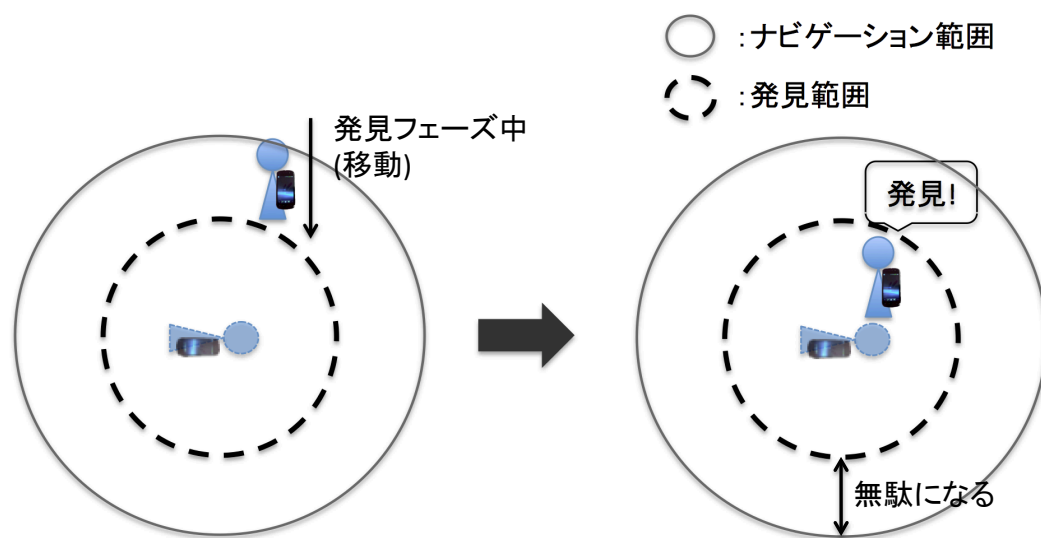


図 5.10: 発見範囲がナビゲーション範囲より小さい場合

5.2.5 発見フェーズの間欠動作間隔の設定

5.2.4 節で述べたとおり探索者端末と被災者端末の消費電力はトレードオフの関係にある。そこで本研究では発見フェーズの設定として2端末の稼働時間に注目

し、2つの場合を考える。一つ目が被災者端末を 200 時間稼働するように設定した場合 (提案方式 1) で、2つ目が被災者端末を最大限に省電力化した場合 (提案方式 2) である。

提案方式 1

ここでは被災者端末を 200 時間稼働させる場合の発見フェーズの設計について考える。まず t_1 、 t_4 は 5.2.4 節で述べたようにそれぞれ $t_1 = T_{dmax} = 30s$ 、 $t_4 = T_{min} = 70msec$ とする。

ここで一般的な携帯電話のバッテリー容量は 7Wh であり、災害はいつどこで発生するかわからないため残量は半分の 3.5Wh と仮定する。このバッテリー残量 3.5Wh で被災者端末を 200 時間稼働させるために、 $3.5Wh \div 200h = 17.5mW$ より、被災者端末の平均消費電力が 17.5mW となるように t_3 を設定する。端末の平均消費電力は、

$$\frac{(\text{送信消費電力 [W]} \times \text{送信の間欠動作割合}) + (\text{受信消費電力 [W]} \times \text{受信の間欠動作割合})}{t_3}$$

で求めることができる。提案方式の送受信電力は雪崩ビーコンと同様で、送信電力 1.29W と受信電力 0.45W より、

$$17.5mW = \frac{(1.29W \times 70msec) + (0.45W \times 70msec)}{t_3}$$

となり、これを t_3 について解くと $t_3 = 6.96sec$ となる。

また t_2 は $t_2 = t_3 + t_4$ より、7.03sec となる。提案方式 1 の設定での発見フェーズの動作を図 5.11 に示す。

提案方式 2

ここでは搜索者端末に対して被災者端末の省電力化を優先し、搜索者端末側に最大に消費電力を割り振った形を考える。具体的には搜索者端末側の間欠動作間

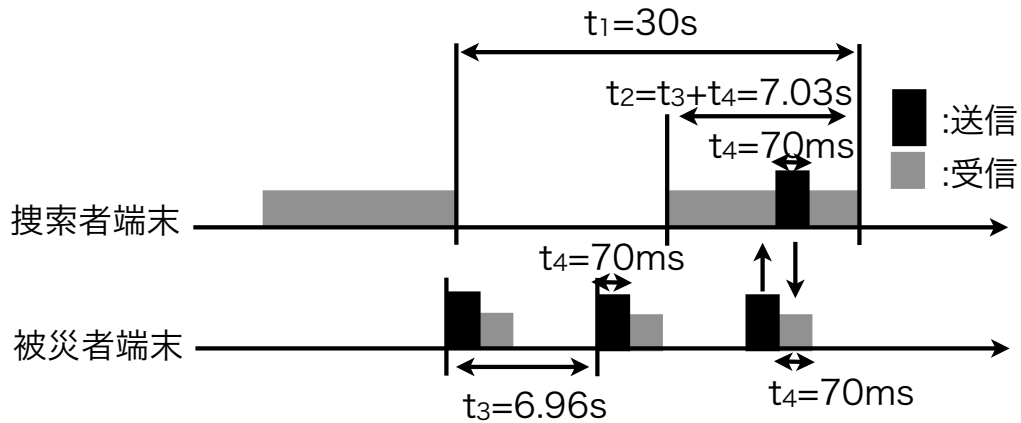


図 5.11: 提案方式 1

隔に対する受信時間の割合を 100%にした場合である ($t_1 = t_2 = t_3 = T_{dmax}$)。 T_{min} は 5.2.4 節で述べたように 70msec とする。

提案方式 2 の発見フェーズの動作を図 5.12 示す。この設計では被災者端末は 30 秒周期で、70msec の発見信号の送信と 70msec ナビゲーションフェーズ移行信号の受信待ちの間欠動作を行う。それに対し搜索者端末は常に発見信号の受信待受動作を行う。そして被災者端末の発見信号を受信すると、その応答としてナビゲーションフェーズ移行信号を送信する。

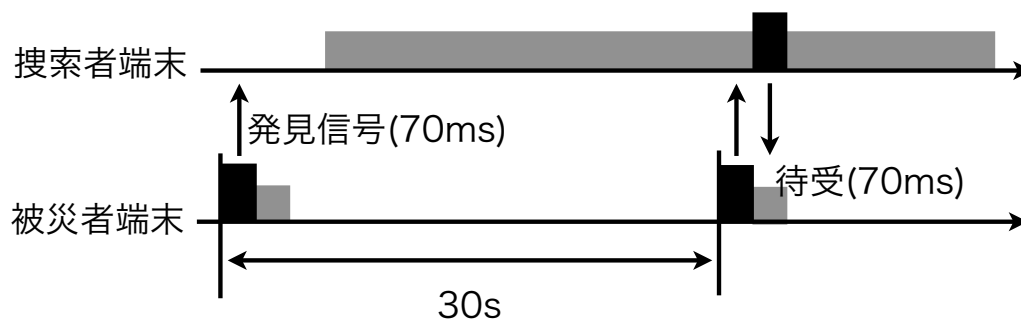


図 5.12: 提案方式 2

5.2.6 ナビゲーションフェーズ

ナビゲーションフェーズは雪崩ビーコンの搜索方式を参考に設計した。ナビゲーションフェーズでの搜索者端末と被災者端末の動作を図 5.13 に示す。

ナビゲーションフェーズでは被災者端末はナビゲーション信号を送信する。ナビゲーション信号は 457kHz のキャリアを A1A 変調した信号であり、送信間隔 t_5 、送信時間 t_6 で送信されるものとする。この時送信する信号をナビゲーション信号と呼ぶ。また t_5 、 t_6 は雪崩ビーコンと同様にそれぞれ 0.9sec と 70msec とする。搜索者端末は常に受信状態で、被災者端末からのナビゲーション信号を受信する。そして複数のアンテナにより受信したナビゲーション信号の強度により方向を推定する。

また被災者端末はナビゲーションフェーズに移行したまま搜索されなかった場合を想定し、30 分でタイムアウトとする。タイムアウト後は発見フェーズに戻る。

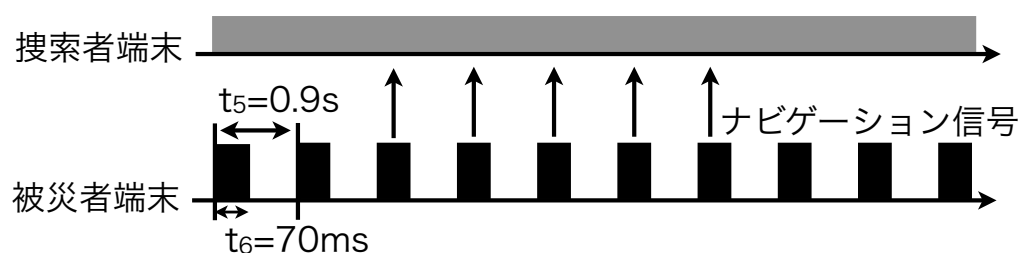


図 5.13: ナビゲーションフェーズの動作

5.3 動作手順

提案システムの携帯電話端末における動作モードの切り替えについて説明する。

図 5.14 に 3 つの動作モード間の状態遷移図を示す。

図中 (1) の遷移は、国や公共機関からの信号を受信し動作モードを切り替えるこ

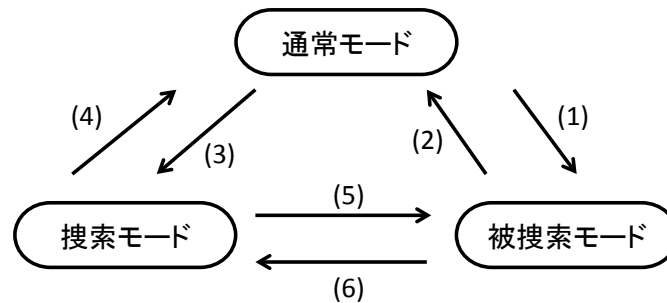


図 5.14: モード遷移

とを選択するか一定時間反応がない場合や、検索側からの被検索モード移行信号を受信し切り替えることを選択するか一定時間反応がない場合、または被災者が身動きがとれ自ら切り替え操作を行う場合である。国や公共機関からの信号は緊急地震速報などである。(2)は発見され、手動でモード切り替え操作を行う場合である。(3)は検索を開始する際、検索者自らの操作により切り替える。(4)は検索終了時に手動で切り替える場合である。(5)は二次災害等の被害により検索者が被災してしまった場合であり、検索モード中、一定間隔で検索者に問いかけ、切り替えることを選択するか一定時間反応がない場合である。(6)は発見されそのまま検索に移るために手動で切り替える場合である。この中で(2)、(3)、(4)、(6)はユーザの手動操作による遷移であり、(1)と(5)は手動の場合もあるが自動でも切り替えが行われる必要がある。

それぞれのモードでの本システムの動作は以下のとおりである。まず図 5.15 に通常モードのフローチャートを示す。メッセージ A、B の内容については図 5.16 に示す。通常モードでは通常の携帯電話動作を行っており、災害時に緊急地震速報などの信号や検索側からの被検索モード移行信号を受けると被検索モードへ移行する。またユーザの切り替え操作でも被検索モードへ移行できる。そして検索時はユーザの切り替え操作により検索モードへ移行する。

次に図 5.17 に被検索モードのフローチャートを示す。被検索モードではまず発

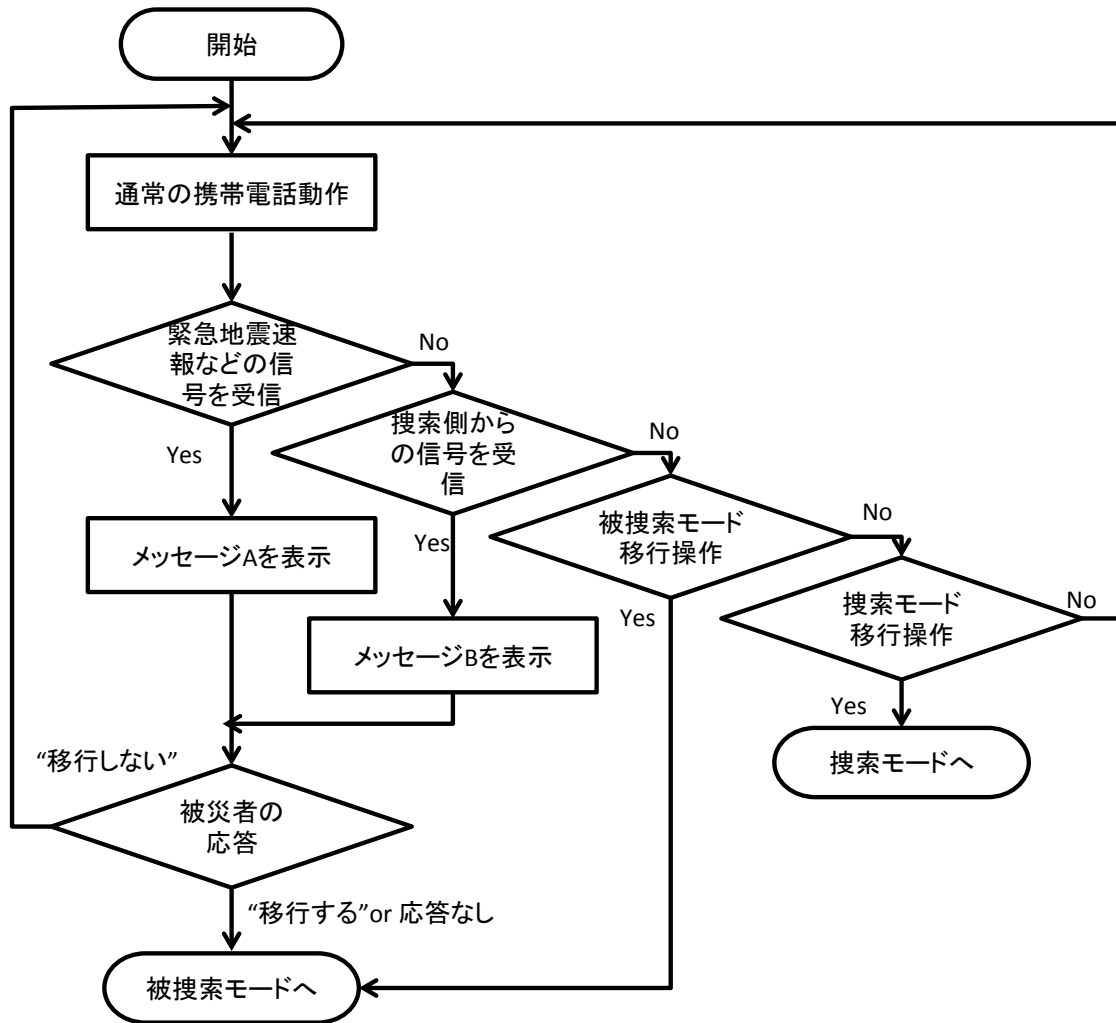


図 5.15: 通常モードのフローチャート

見フェーズで始まる。発見フェーズでは発見信号の送信とナビゲーション移行信号の受信待受を間欠的に繰り返す。この受信待受時に搜索モード端末からのナビゲーションフェーズ移行信号を受信した場合、ナビゲーションフェーズに移行する。ナビゲーションフェーズではナビゲーション信号の間欠的な送信を行う。

ナビゲーションフェーズは 30 分でタイムアウトとなり、発見フェーズに戻る。被災者が発見され、端末が回収されると端末の操作により通常モードや搜索モードに移る。

メッセージA

災害時緊急信号を受信しました。
被搜索モードに移行しますか？

移行する 移行しない

メッセージB

〇〇さんがあなたを探しています。
被搜索モードに移行しますか？

移行する 移行しない

図 5.16: メッセージ A、B の内容

最後に図 5.18 に搜索モードのフローチャートを示す。メッセージ C の内容については図 5.19 に示す。搜索モードも被搜索モードと同様に発見フェーズとナビゲーションフェーズに分かれている。まず発見フェーズで始まる。発見フェーズでは発見信号の受信待受を間欠的か継続的に行う (提案方式 1 の場合間欠、2 の場合継続)。被搜索モード端末の発見信号を受信した場合は、その信号に含まれる ID を記録する。発見信号を受信した際は音や振動で搜索者に伝える。また一定時間ごとに搜索を継続するかを確認するのメッセージを表示し「被搜索モードへ移行」が選ばれるか搜索者からの応答が一定時間ない場合、被搜索モードに移る。これは二次災害により搜索者が被災してしまう可能性があるためである。これを搜索対象の ID が選択されるまで続ける。

発見フェーズで取得した被災者端末の ID の中からナビゲーション対象の端末の ID を選択することより、ナビゲーションフェーズに移行する。そして対象の被搜索モード端末の ID を含むナビゲーションフェーズ移行信号が送信される。その後ナビゲーション信号を受信し、その信号の強度などから被搜索モード端末の方向を表示する。ここでも二次災害を想定し、一定時間ごとに搜索を継続するかを確

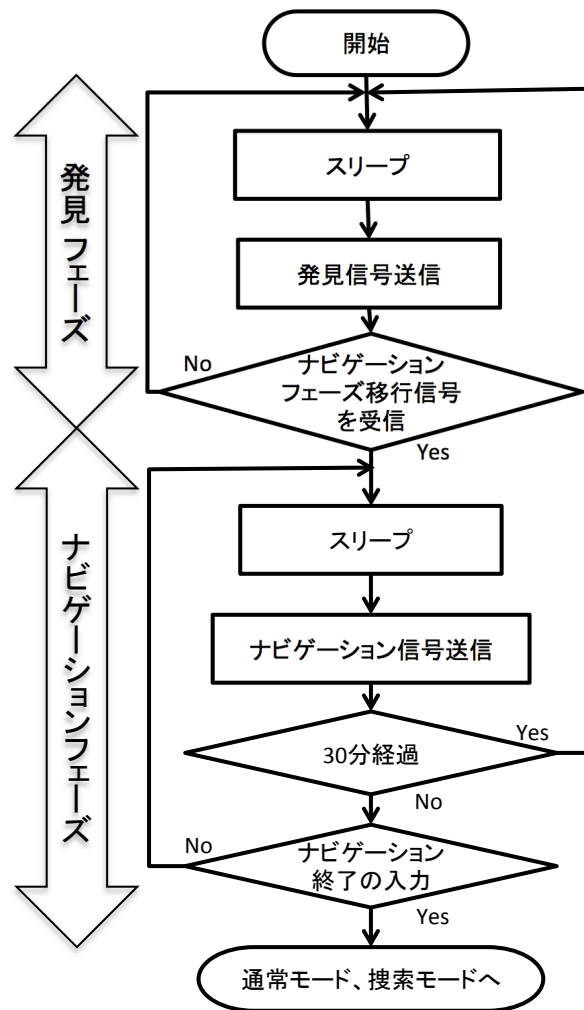


図 5.17: 被搜索モードのフローチャート

認するメッセージを表示する。ナビゲーション終了した際は、通常モードに移行するか発見フェーズに戻る。なおここでは逐次処理の手順を示しているがイベント駆動型の実装も考えられる。

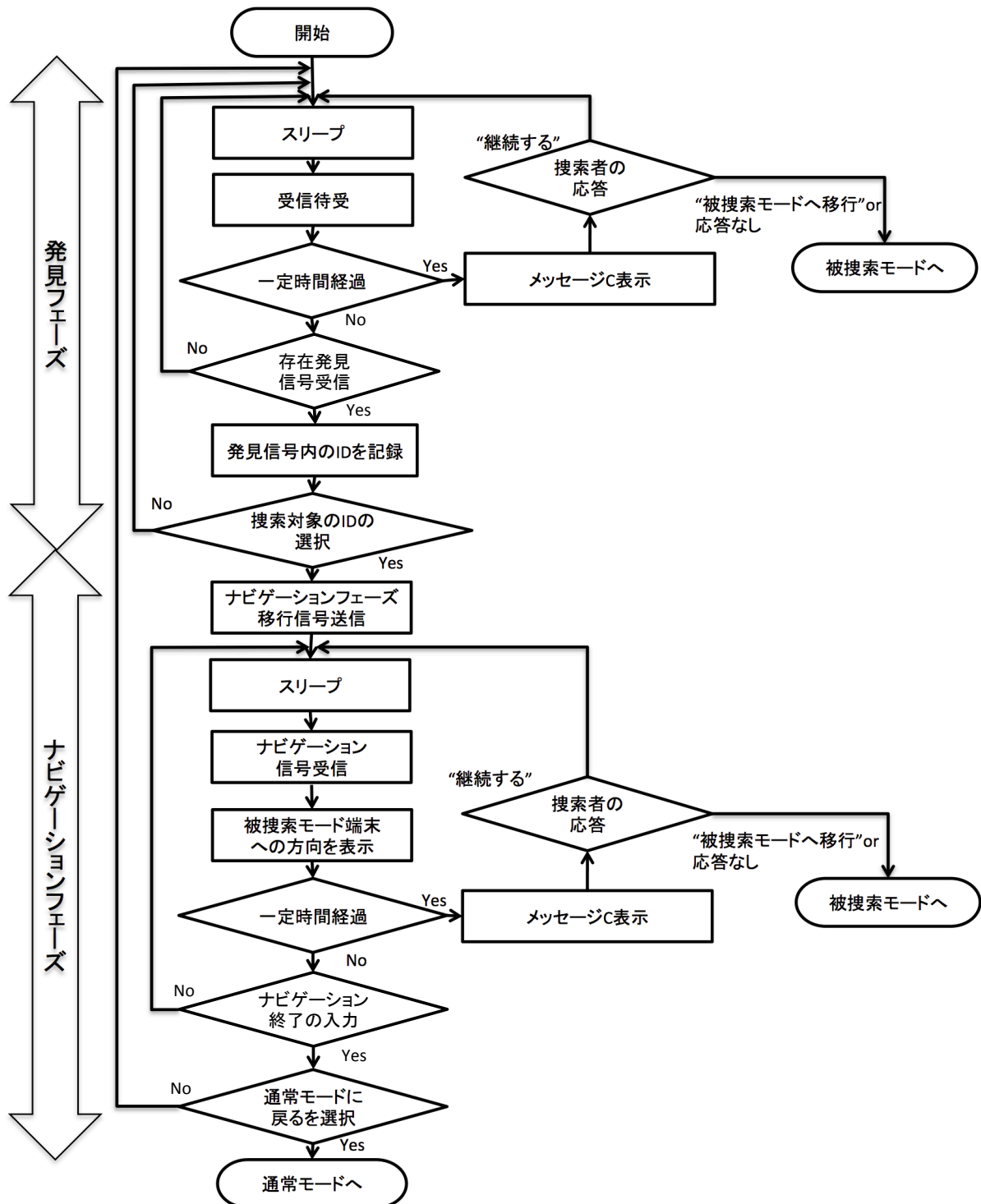


図 5.18: 搜索モードのフローチャート

メッセージC

二次災害確認です。
検索を継続しますか？

図 5.19: メッセージ C の内容

5.4 利用シナリオ

5.4.1 災害直後の流れ

提案システム利用時の被災地住民の行動について述べる。まず被災地住民の携帯電話端末は災害が発生の際に、国や公共機関から緊急地震速報などの信号を受ける。そこで携帯電話端末は被搜索モードへ移行するかを被災地住民に画面にメッセージを表示することで問いかけ、移行が選ばれるか一定時間返答がない場合、自動で被搜索モードへ移行する。ここで被災地住民が無事な場合は避難を始める。避難途中で災害に会ってしまった場合に対応するため、携帯電話端末を手動で被搜索モードへ切り替えられる。そして避難が完了し安全の確保ができた被災地住民は搜索を行う。

5.4.2 搜索

安全を確保できた被災地住民が搜索者となり搜索を開始する際、携帯電話端末を搜索モードへ切り替える。搜索は大きく分けて1人で搜索を行う場合と複数人で分担して搜索を行う場合が考えられる。

1人での搜索

まず1人での搜索について述べる。1人での搜索ではまず発見フェーズによる被災者の存在を探すことを行う。発見フェーズでは、搜索者は被災者が居そうな場所の周辺を歩き回る。被災者が信号の範囲内に居ると搜索者の端末にその被災者が近くにいるという情報が表示される。被災者の発見が行えた場合、搜索する被災者を端末上で選択することでナビゲーションフェーズに移る。ナビゲーションフェーズでは、端末上に搜索対象の被災者への方向が表示される。搜索者はその方向に歩いて行くだけで被災者の場所へたどり着ける。その後は状況に応じて救助を行うか、場所を記録し救助隊に知らせる。1人での搜索について図 5.20 にまとめる。

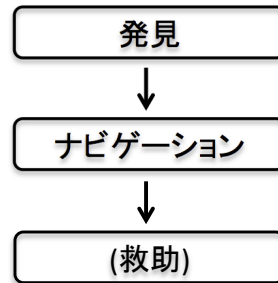


図 5.20: 1 人での検索

複数人での検索

次に複数人での検索について述べる。複数人で検索を行う場合は役割分担をすると効率が良くなる。提案システムでは発見フェーズとナビゲーションフェーズに分かれていることから、この2つのフェーズで分担する。発見フェーズの担当者は被災地を歩き回り、発見フェーズの機能により被搜索モード端末を発見した位置座標とIDを記録する。そしてナビゲーションフェーズ担当者は発見した位置座標とIDをBluetoothにより発見フェーズの担当者から受けとり、その場所からナビゲーションを行う。また一般人でも救助できそうな場合は救助担当を設けることも考えられる。複数人での検索について図 5.21 に示す。

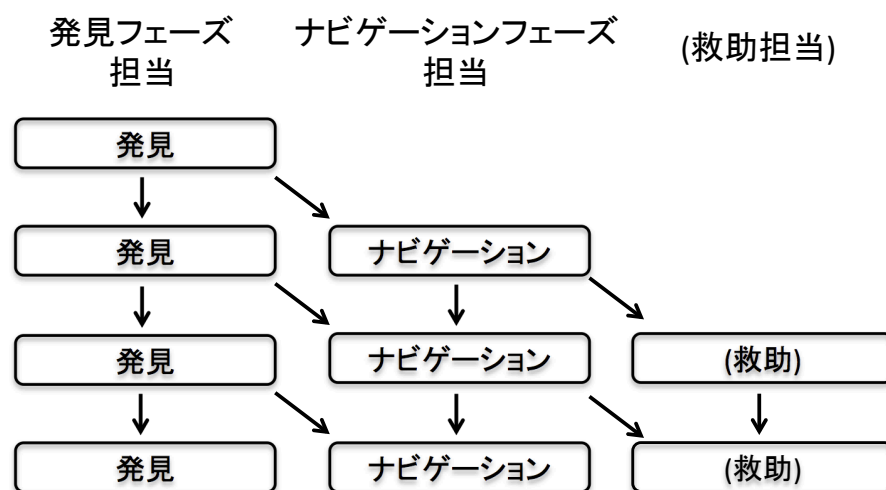


図 5.21: 複数人での搜索

第 6 章

評価

6.1 稼働時間の評価

本研究では被災者検索機能を発見フェーズとナビゲーションフェーズに分け、発見フェーズでの工夫により携帯電話端末の稼働時間を確保した。そこで提案方式 1、2 について稼働時間を評価した。本節ではこれらの評価結果について述べる。

稼働時間は

$$\text{稼働時間} [h] = \frac{\text{バッテリー残量} [Wh]}{\text{消費電力} [W] \times \text{間欠動作割合}}$$

により求められる。表 6.1 に雪崩ビーコン方式と提案方式 1、2 の稼働時間を示す。雪崩ビーコン方式は雪崩ビーコンの搜索方式をスマートフォンのバッテリー容量で行った場合である。すなわちすべてナビゲーションフェーズの場合である。

表 6.1: 稼働時間の比較

	雪崩ビーコン方式	提案方式 1	提案方式 2
搜索者端末	7.8h	33.2h	7.8h
被災者端末	14.3h	200h	862h

まず雪崩ビーコン方式では、搜索者端末の稼働時間は 7.8h である。搜索者端末は搜索を行うときだけ稼働させれば良いので、稼働時間は被災者端末に比べ

少ない。しかし7.8hでは十分とは言えない。さらに被災者端末ののべ稼働時間は14.3hであり、被災者端末は常に稼働している必要があるため一日も稼働しない。

それに対し提案方式2では被災者端末ののべ稼働時間は862hであり、約36日稼働する。しかし搜索者端末は雪崩ビーコン方式の搜索者端末と同様でのべ稼働時間は7.8hである。

提案方式1では、搜索者端末ののべ稼働時間は33.2hであり、被災者端末ののべ稼働時間は200hである。これは雪崩ビーコン方式と比較すると搜索者端末の稼働時間が約4.3倍、被災者端末の稼働時間が約14倍となっている。

これらより提案方式1は、被災者端末の200時間の稼働時間を確保し、さらに搜索者端末についても約4.3倍となっている。

6.2 被災者搜索システムの評価

被災者搜索システムの要求条件は3.2節で述べたように以下の通りである。

- ・ ネットワーク設備に依存しない：

災害時は携帯電話基地局等のネットワーク設備が利用できなくなる可能性があるため。

- ・ 被災者が機器の操作を必要としない：

被災者ががれき等に埋もれてしまい身動きがとれないことが想定されるため。

- ・ 救助隊を待つことなく迅速な搜索が可能：

被災者の家族など無事ですぐに対応可能な者が搜索を行うことで迅速な救助につなげることができる。

- ・ 一般の被災地住民が容易に利用できる：

利用にスキルを要する技術は災害時には使われない可能性がある。

- ・ 十分な稼働時間(200時間)：

十分な搜索時間の確保が必要。

.....

提案システムは端末自身が発する信号の送受信のみで検索を行うため「ネットワーク設備に依存しない」を満たす。

また提案システムは5.3節で述べたように、図5.14中の(1)、(5)の被検索モードへの遷移における自動での切り替わり動作を明確にした。そして被検索モードではナビゲーション信号を送信し続けるだけであり被災者の操作は必要ない。これらにより「被災者の操作を必要としない」を満たしている。

また携帯電話と組み合わせることで「救助隊を待つことなく迅速な検索が可能」を満たす。これは携帯電話は一般の人々が日常的に携帯する機器であるからである。

さらにナビゲーションの機能により「一般の被災地住民が容易に利用できる」満たすことができる。

最後に5.2節で述べたように検索機能を2フェーズに分けることにより「十分な稼働時間」を満たしている。

第 7 章

考察

7.1 複数の被災者の搜索

大規模災害時の被災者搜索では周囲に複数の被災者がいる場合が多いと想定される。複数の被搜索モードの端末があると発見信号の重複が発生する可能性がある。信号の重複が発生すると搜索モード端末は発見信号を受信することができず、被搜索モード端末を発見できない。複数の被搜索モード端末でタイミング悪く同時に信号を送信してしまうか、被搜索モード端末の間欠動作が完全に重なってしまうと重複が発生する。重複の確率は以下の通りである。

ここで発見範囲内の最大被災者数を考える。最大被災者密度が 3.1 節で述べたように $3,000 \text{ 人}/\text{km}^2$ であり、発見範囲は搜索者から半径 50m の円内であることから発見範囲内の最大被災者数は約 24 人となる。発見フェーズの搜索者端末の一回の受信間隔 t_1 は 30sec、信号の送受信の時間 t_4 は 70msec である。簡単のため 30sec を 70msec ごとのスロットに分割すると約 429 スロットとなる。429 スロットに対してランダムに 24 人が送信した場合の衝突の確率はバースデーパラドックスより約 48% となる。これらより衝突回避の工夫が必要である。

またすべての被搜索モード端末の送信間隔 t_3 は同一であるため、2つの端末間で送信タイミングが一致した場合いつまでも衝突が解消されない。この問題については端末ごとに被搜索モードの送信間隔 t_3 をランダムに数百ミリ秒ずらす方法で避けられると考えられる。

7.2 省電力化

提案システムでは、信号の送信時間 t_4 を雪崩ビーコンの仕様の最低値である 70msec としている。これに関しては搜索性能に影響がない程度に小さくすることによりさらなる省電力化が期待できる。 t_4 を小さくした影響はシミュレーションおよび実装により確認する必要がある。

7.3 実装

被搜索モードに関しては動作が単純であり、外部ハードウェアによりスマートフォン部分と切り離した実装も可能である。搜索モードに関しては被搜索モード端末の方向を求めることやその方向を表示するためにスマートフォンの CPU やディスプレイを用いるのが良いと考えられる。

実装を行う上で携帯電話等の日常的に用いられるモバイルデバイスに被災者搜索機能を搭載することにより、携帯電話が大きくなることは避ける必要がある。提案方式は回路自体は大きくないが、搜索のための信号の送受信にバーアンテナを用いることを想定している。また方向を推定しナビゲーションによる搜索を行うために、バーアンテナは複数必要となる。そこで搜索性能と小型化の両立のために、バーアンテナの本数やサイズについて実装により検証を行うことが考えられる。

また AM 変調による ID 埋込についても実装による検証が必要である。

第 8 章

おわりに

本研究では、携帯電話等のモバイルデバイスに機能を付加することにより、災害時の被災者捜索を行うシステムを提案した。提案した被災者捜索システムでは捜索を発見フェーズとナビゲーションフェーズの2つに分け、発見フェーズにおける省電力化と、ナビゲーションフェーズにおける容易な捜索を両立した。発見フェーズでは、端末の無線通信を間欠動作させることにより電力消費を抑えている。ナビゲーションフェーズでは、一般の人々でも容易に捜索が行えるよう、ナビゲーション機能の優れた雪崩ビーコンの捜索方式を取り入れた。これによりスキルを持たない人でも容易に捜索が行える。

また一般の人々が日常携帯する携帯電話やスマートフォンなどのモバイルデバイスに被災者捜索機能を搭載することで、被災地において無事だった者が救助隊を待つことなくすぐに一次捜索を開始できる。一般の被災地住民による素早い捜索により、より多くの人命が救える。

提案システムでは端末のみで捜索が行えるため、災害により携帯電話基地局等のネットワーク設備が利用できない場合でも捜索可能となる。

提案システムでは通常の携帯電話動作から被捜索動作へ自動で切り替わる、また被捜索動作では被災者の操作を必要としない。そのため被災の際に被災者が気を失ってしまった場合やがれき等に埋もれ身動きがとれなくなってしまった場合でも本システムにより捜索されることが期待できる。

今後はプロトタイプを作成し、動作検証を行うことが考えられる。また携帯電

.....

話に内蔵するための小型化の検討が必要である。

謝辞

本研究を遂行するにあたっては、いろいろな方々にお世話になりました。

まず指導教員の鶴岡行雄先生には日頃から熱心なご指導、そしてご鞭撻を賜わりました。またご多忙中にもかかわらず論文の草稿を丁寧に読んで下さり、大変貴重なご助言をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

また、多田好克先生、小宮常康先生、佐藤喬さん、大阪大学山口弘純先生には研究を進める上で貴重な意見や助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

そして本研究が行なえたことは、研究方針や方法論について議論をし、共に研究生生活をおくってきた、鶴岡研究室をはじめとした基盤ソフトウェア学講座の学生諸氏のおかげでもあります。最後に、これらの皆さんに感謝いたします。

参考文献

- [1] 柳田真理雄, 椿信男, 松村唯伸, 内田康彦, “コンピュータ機器の地震対策”, 電子情報通信学会誌, 79 巻 1 号, pp.41–48.
- [2] 河田恵昭, “大規模地震災害による人的被害の予測”, 自然災害科学 J.JSNDS 16-1 ,pp3–13, 1997.
- [3] 江原勝幸, “災害弱者援助における地域ネットワークの活用”, 静岡県立大学短期大学部研究紀要 18-W号.
- [4] 河田恵昭, “阪神・淡路大震災の教訓の総合化”, 都市問題研究 No.553, pp.14–32, 1997.
- [5] 吉村孝志, 竹内宏之, “首都圏直下の地震と強震動 ー安政江戸地震と明治東京地震ー”, 地学雑誌 Vol.116 No.3–4, pp.431–450, 2007.
- [6] S.L. Toral and F. Barrero, “A Wireless In-door System for Assisting Victims and Rescue Equipments in a Disaster Management,” 2010 International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems, pp.502–506.
- [7] 森茂雄, 後藤眞二, 荒井郁男, “電波による埋没生存者の存在および位置計測の一方方法”, 電子情報通信学会技術研究報告. SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス 100(637), pp.33–38, 2001–02–16.
- [8] 亀川哲志, 松野文俊, “遠隔操作性を考慮した双頭ヘビ型レスキューロボット KOHGA の開発”, 日本ロボット学会誌 25(7), pp.1074–1081, 2007–10–15.
- [9] 田所諭, “レスキューロボットの現状と未来”, 電子情報通信学会誌 92(3), pp.203–208, 2009–03–01.

- [10] European Telecommunication Standard, “Radio Equipment and systems (RES); Avalanche Beacons; Transmitter-receiver system,” ETS 300 718, 1997.
- [11] “MAMMUT PULSE Barryvox” http://www.mammut.ch/ja/productDetail/231000020_v_1013/PULSE-Barryvox.html
- [12] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu, “Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems,” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, Vol.37, No.6, pp.1067-1080, Nov. 2007.
- [13] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, “RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System,” IEEE INFOCOM2000, pp.775–784, March 2000.
- [14] K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy, “Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting,” IEEE INFOCOM2004, pp. 1012–1022, March 2004.
- [15] N. Priyantha, A. Chakraborty and H. Balakrishnan, “The Cricket Location-Support System,” ACM MobiCom, pp. 32–43, Aug. 2000.
- [16] C. Peng, G. Shen, Y. Zhang, Y. Li and K. Tan, “BeepBeep: a High Accuracy Acoustic Ranging System using COTS Mobile Devices,” The ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys’07), pp. 1–14, 2007.
- [17] E. D. Kaplan (ed.), “Understanding GPS: Principles and Applications,” Artech House, 1996.
- [18] D. Ashbrook and T. Starner, “Learning Significant Locations and Predicting User Movement with GPS,” Sixth International Symposium on Wearable

- Computers (ISWC'02), pp.101–108, 2002.
- [19] Z. Zhang, X. Zhou, W. Zhang, Y. Zhang, G. Wang, B. Y. Zhao and H. Zheng, “I am the Antenna: Accurate Outdoor AP Location Using Smartphones,” ACM MobiCom2011, pp. 109–120, 2011.
- [20] Brad Karp and H. T. Kung, “GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks,” MobiCom2000, pp.243–254, 2000.
- [21] James Newsome and Dawn Song, “GEM: Graph EMbedding for routing and data-centric storage in sensor networks without geographic information,” The ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys2003), pp.76–88, 2003.
- [22] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin, “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks,” IEEE INFOCOM, vol.3, pp.1567–1576, 2002.
- [23] T. van Dam and K. Langendoen, “An adaptive energy- efficient mac protocol for wireless sensor networks,” The ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), pp.171–180, 2003.
- [24] J. Polastre, J. Hill and D. Culler, “Versatile low power media access for wireless sensor networks,” The ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys2004), pp.95–107, 2004.
- [25] M. Buettner, G.V. Yee, E. Anderson and R. Han, “XMAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks,” The ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys2006), pp.307–320, 2006.

- [26] Injong Rhee, Ajit Warrier, Mahesh Aia, Jeongki Min and Mihail L. Sichitiu, “Z-mac: a hybrid MAC for wireless sensor networks,” IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.16, pp.511–524, 2008.
- [27] 椎尾一郎, “RFID を利用したユーザ位置検出システム”, 情報処理学会研究報告 HI, ヒューマンインタフェース研究会報告 2000(39), pp.45–50.
- [28] “雪崩について” <http://www.jac.or.jp/info/iinkai/iryou/page-03-007.html>
- [29] 東京都総務局統計部, “東京都昼間人口の予測 ー統計データー 平成 22 年 3 月” <http://www.toukei.metro.tokyo.jp/tyosoku/ty-data.htm>
- [30] Thomas Lund, “SIGNAL STRENGTH VERSUS SIGNAL TIMING: Achieving reliability in multiple burial searches,” NEWZLAND AVALANCHE Centre, Gear and Technique Reviews.
- [31] “雪崩ビーコン練習用 発信器の製作”
<http://www.asahi-net.or.jp/~dq5h-kmnt/akiba/BEACON-PRE.htm>
- [32] “IOIO for Android”
<http://www.sparkfun.com/products/10748>
- [33] 永井智大, 鶴岡行雄, 山口弘純, 多田好克, “雪崩ビーコンに基づく被災者捜索システム”, 信学技報, vol.111, no.384, MoMuC2011-44, pp.43–48, 2012 年 1 月.

付録 A

実装

本章では提案システムのナビゲーション信号の送信と受信を行う回路のプロトタイプの実装について述べる。

A.1 送信回路

A.1.1 回路設計

送信回路は雪崩ビーコン発信器の回路 [31] を参考に設計した。回路図を図 A.1 に示す。

送信回路は図中左上の部分で 455kHz のセラロックに直列にコンデンサ入れて、雪崩ビーコンの周波数である 457kHz を発振させている。また図中左下部分で 1Hz 発振器にダイオードと抵抗を入れて、デューティ比を変え 0 の時間の割合を多くしている。この 2 つの回路の出力を NAND ゲートに入れることでナビゲーション信号を出力させている。そしてインバータ 3 つによる増幅回路を通して出力となる。RF-OUT の先はバーアンテナとなる。図中右下の LED は 457kHz のキャリア信号が出ているときに光るようになっている。

また図 A.1 の回路だけでは出力が弱かったためトランジスタによる増幅回路を出力部分に追加した。今回は増幅率の高い固定バイアス回路とした。作製した増幅回路を図 A.2 に示す。

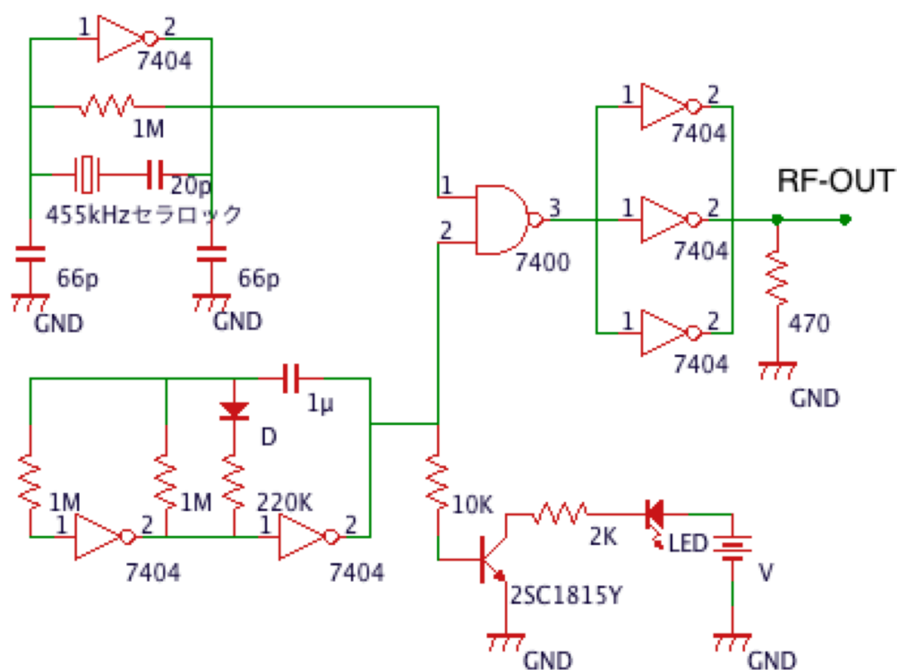


図 A.1: 送信回路 (文献 [31] を一部改変)

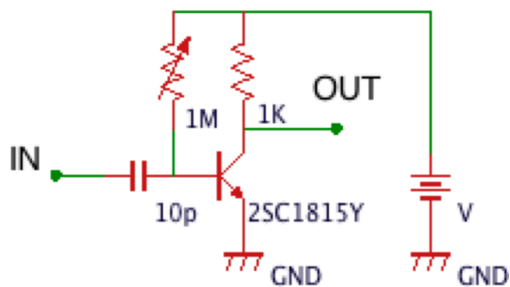


図 A.2: 増幅回路

A.1.2 回路実装と問題

今回はまずブレッドボードにより実装を行った (図 A.3)。

実装した回路はオシロスコープにより電波が雪崩ビーコンと同様の間隔で出力されていることが確認できた。しかし実装した回路では出力される電波の周波数

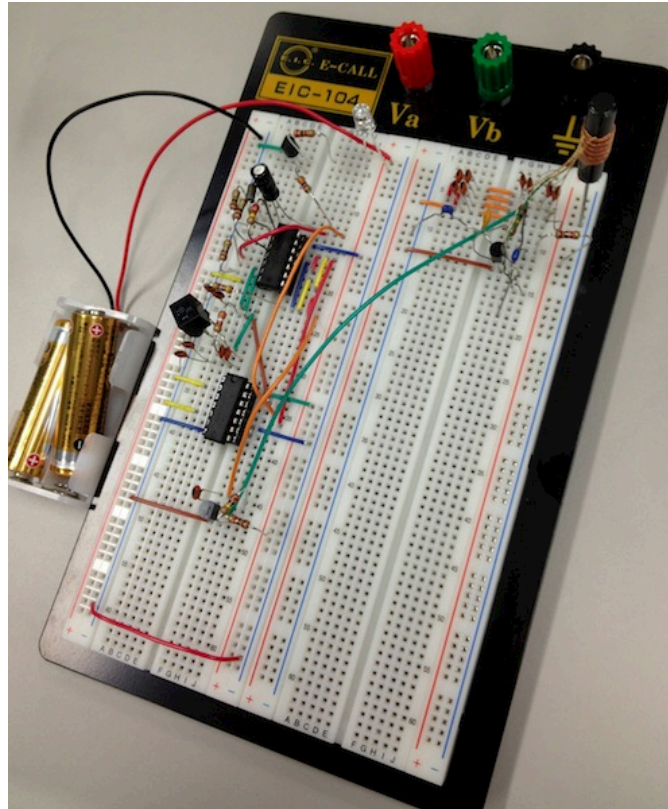


図 A.3: ブレッドボードによる実装

が 462kHz となっていた。コンデンサ容量や抵抗値を変えてみたが直らず、新しくセラロックを用意したが変化はなかった。そこでブレッドボード上で実装しているためキャパシタンスが生まれてしまうことや、空中配線が問題であると考えユニバーサル基板上での実装を行った (図 A.4)。しかしブレッドボード上で実装したものと同様の結果であった。周波数がずれてしまうことに関しては原因は不明であった。雪崩ビーコンとの互換性は無くなるが、提案システムの受信部分を 462kHz に合わせれば動作可能であると考えられる。

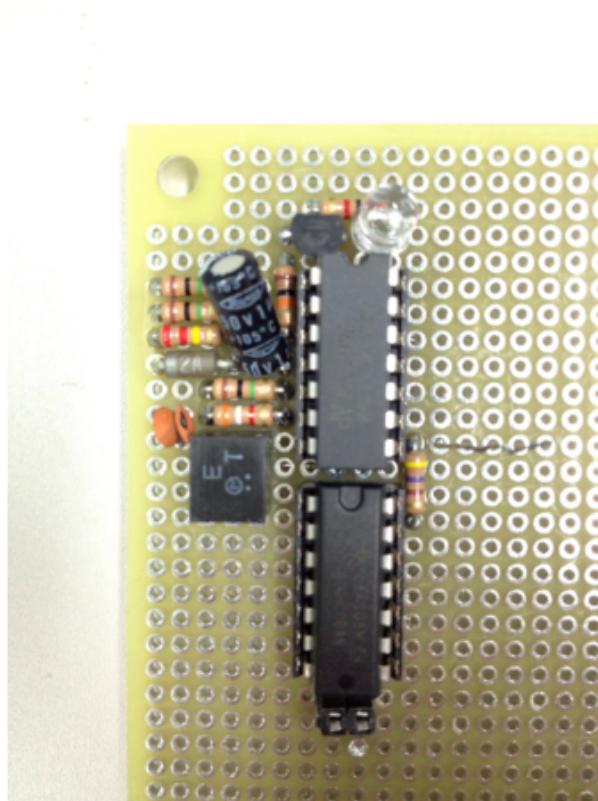


図 A.4: ユニバーサル基板による実装

A.2 受信回路

A.2.1 回路実装

受信回路はバーアンテナ (図 A.5) に送信回路でも用いたトランジスタによる増幅回路 (図 A.2) を繋げることで実装した。

今回実装が完了したのは、この受信回路までである。

雪崩ビーコンの MAMMUT PULSE Barryvox[11] では、3 本のアンテナにより精度の高いナビゲーションを実現している。これはそれぞれのアンテナでの受信信号の強度から、より正確な被災者の方向を計算するためと考えられる。提案システムでも同様の方法でナビゲーションを実現する。



図 A.5: バーアンテナ

A.2.2 Android 端末との接続

Android 端末との接続方法として Bluetooth と IOIO(ヨーヨー)[32] で検討を行った。IOIO は Android と自作ハードウェアを接続するためのボードである。Android 端末と IOIO を接続した様子を図 A.6 に示す。左の基板が IOIO である。

IOIO は Android 向けのハードウェア試作のために、Google 社が提供している ADK(Accessory Development Kit) のプロトコルを用いて Android アプリケーションから IOIO 上に備えた IO に接続されたデバイス进行操作する。IOIO には Java のライブラリが提供されており、他の ADK 用ボードに比べ容易に実装できる。

Bluetooth で接続する場合、マイコンを用意し Bluetooth モジュールを制御する必要があることから IOIO の方が実装が容易である。またビーコン回路は最終的には内蔵を目指すことから Bluetooth で実装することのメリットは少ないと考え IOIO で実装を進めた。



図 A.6: IOIO