

ミリ波パッシブイメージング装置の開発と実用化

実施予定期間：平成 22 年度～平成 26 年度
研究代表者：陳 強（東北大学大学院工学研究科通信工学専攻 兼 東北大学未来科学技術共同研究センター）

I. 概要

空港等の高度の保安対策を要する拠点における、テロ・破壊工作等を未然に防ぐための、危険物検知システムとして、ミリ波パッシブイメージング装置の小型化、軽量化、高画質化を図るとともに、空港保安検査場等の設置余地を考慮し、既設装置との併設あるいは一体化が可能な装置を開発する。製品化は基本性能を向上させ随時進める。分解能と装置サイズの関係をもとに、空港保安等を担う関係機関の要望、プライバシーの問題を相互に配慮した装置を実用化する。また、金属探知機との一体化が容易な壁型装置等の開発を進めるとともに、二次的な検査を目的としたハンディー型装置の開発を進める。最終的に、開発した装置の量産化・低コスト化を実現することを目標とする。

1. 目標

使用目的：空港、港湾などの水際で人が所持している危険物と想定される液体や粉末を検知可能なミリ波パッシブイメージング装置を開発し、実用化する。空港の保安検査場は、新規機器の設置余地が小さく、また、検査場における人の流れを止めてはならない。本課題では、据え置き型パッシブ装置の小型化、軽量化、高画質化を図るとともに、金属探知機等の既設装置との一体化が可能な壁型装置とともに、2 次検査用の詳細検査を目的としたハンディー型の開発を進め、最終的に、量産化・低コスト化の実現を目標とする。開発する装置は、プライバシーの問題に十分配慮した運用形態とする。

検知対象：既設の検知機器（X 線検査装置、金属探知機）を補完する形で、人が所持する液体や粉末を検知対象とする。

大きさ、重量：装置の大きさと重量は、据え置き型装置は家庭用洗濯機の大きさ、壁型装置は、幅 1.2 m、高さ 1.5 m、厚さ 30 cm、2 枚の壁の間隔が 1.5 m の大きさで、一人で簡単に機器の移動が可能な重量を目標とする。ハンディー型装置は、幅 200 mm、長さ 400 mm 程度、2 kg 程度の重量を目標とする。

テーマ設定（ユーザーニーズ）との整合性：

空港、港湾などで検査装置において求められる特徴は、検査に際して顧客の移動を妨げてはならないということである。具体的には、1 時間当たり 1000 人以上検査することが望まれている。このため、据え置き型装置では撮像速度が 1 秒間に数枚を確保する。壁型装置では撮像速度が 2 秒で 1 枚の静止画像を目標とする。また、圧迫感のない装置を目指して開発する。容器に入った液体物が検知可能な分解能を目指す。

2. 技術的内容

a. 据え置き型装置の光学系の小型化と軽量化

既製の据え置き型装置では誘電体レンズと振動するリフレクタ板を利用しているが、装置が大きくなり、重量も大きいという問題があった。これらの問題を解決するために、従来の誘電体レンズと振動リフレクタ板による構成を、新たな光学設計技術を取り入れて軽量化を目指す。

b. 壁型装置の新規開発

金属探知機との一体化が可能な壁型装置を開発する。本課題では、既製の据え置き型装置の開発で設計された光学系を応用し、新規の壁型装置を開発する。

既製の据え置き型装置の光学系を壁型装置形状に最適な構造にし、据え置き型装置と同等な空間分解能を得ることを基本として、装置、及び撮像モジュールの開発を進める。壁型装置、若しくはハンディー型装置に転用可能な小型撮像モジュール開発検討の為に、近傍イメージングの実験と数値シミュレーション、およびアンテナの高利得化を図った近傍検出器の設計・試作を進める。

c. ハンディー型装置の新規開発

人体の部分的な検査が可能な二次検査装置として、ハンディー型装置の開発を行う。検査官による使用を想定した場合、不審物を映像化することは必ずしも必要ではないため、ハンディー型装置としては、異物の反応を検出してアラームを発するライン走査型不審物検知装置として主に開発を進める。ハンディー型の光学系は小型撮像モジュールの光学系と共通化が可能であり、小型 1 次元イメージング素子アレー収納ケースおよび画像処理装置の超小型化を図る。

d. 要素技術

- 1) リアルタイム校正法の改良
- 2) 低雑音 MMIC の開発
- 3) イメージング素子アレーの最適配置設計による高分解能化
- 4) ミリ波光学系の自動焦点・ズーム機能の開発
- 5) イメージング素子用温度測定／補正回路の開発・評価
- 6) ハンディー型対応専用小型インターフェースの開発
- 7) パイプライン処理を用いた高速化処理の開発
- 8) ミリ波画像を用いた物体認識

3. 技術開発期間終了時の目標

- 1) 空港、港湾での設置環境に適応した、金属探知機との併設が可能でかつ家庭用洗濯機程度のサイズを実現した据え置き型ミリ波パッシブイメージング装置のプロトタイプを製品化する。機器性能としては、1 秒間に 4 枚の画像撮像を可能とし、危険物検出としては容器に入った液体を検出可能とし、特定の種類の物質に対しては同定も可能とする。
- 2) 金属探知機との一体化が容易な壁型ミリ波パッシブイメージング装置を開発する。装置サイズ幅 1.2 m、高さ 1.5 m、厚さ 30 cm、2 枚の壁の間隔が 1.5 m、一人で簡単に機器の移動が可能な重量を実現する。
- 3) 二次検査に使用可能なハンディー型ミリ波パッシブ不審物検知装置を開発する。重量は 2 kg 以下とし、危険物検知・警報の発報を可能とする

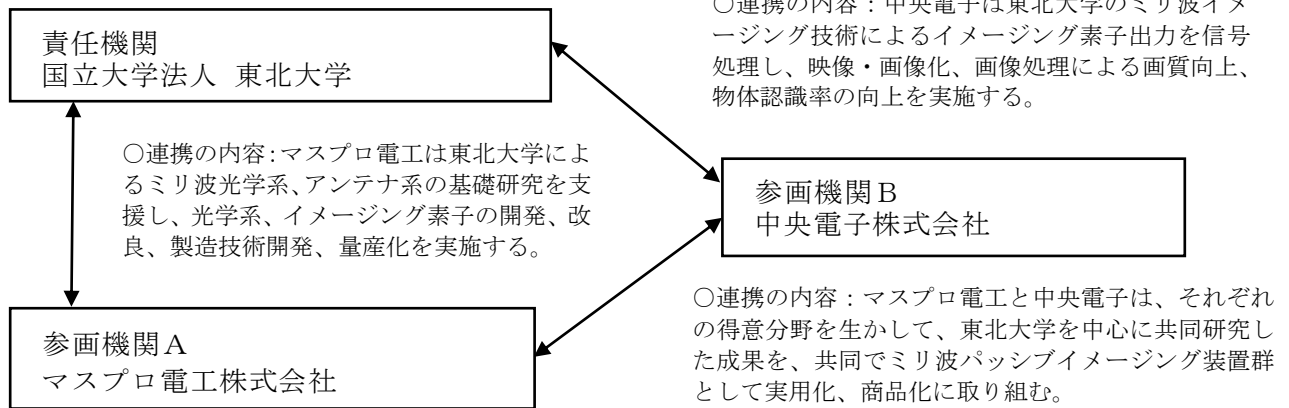
4. 実証期間終了時の目標

- 1) 金属探知機との併設が可能な据え置き型ミリ波パッシブイメージング装置として、実証試験データをもとに、最終的に量産製品としてのレベルでの完成度を目指す。機器性能としては、1 秒間に 4 枚の画像撮像を可能とし、危険物検出としては容器に入った液体を検出可能とする技術開発時と基本的には同等であるが、実使用とメンテナンスを考慮して、設計寿命 10 年を目指す。

2) 金属探知機との一体化が可能な壁型ミリ波パッシブイメージング装置として、実証試験データをもとに、最終的に量産製品としてのレベルでの完成度をめざす。機器性能としては、2秒で1枚の高分解能撮像を可能とし、危険物検出としては容器に入った液体を検出可能とする。

る。
3) ハンディー型ミリ波パッシブ不審物検知装置について、据え置き型機、壁型機と同様、量産レベルの完成度をめざす。また、更なる軽量化をめざし、最終的には1kg以下の重量実現をめざす。

5. 実施体制



6. 各年度の計画と実績

a. 平成22年度（技術開発期間1年目）

・計画

1)リアルタイム校正法の改良、2)イメージング素子アレーの最適配置設計のためのメカシリンダを用いた基礎実験および数値シミュレーション、3)イメージング素子用温度測定／補正回路の開発、4)LNAの低雑音化を目的とした専用MMICを設計開発および設計評価検証、5)反射鏡の軽量化・小型化・収差最適化のための数値シミュレーション、6)反射鏡による軽量化・小型化・収差最適化の設計・試作、多段反射方式光学系の検討、7)光学系の多段反射方式の開発、8)小型撮像モジュールとハンディー型に対応したインターフェース開発、9)軽量化筐体の開発、10)近傍界イメージングの実験、11)小型レンズアンテナの基礎実験、数値シミュレーション、及び設計、12)壁型装置開発のための近傍検出器の開発、13)小型レンズに代わる近傍検出器の数値シミュレーションと近傍界映像化方式の検討・開発、14)ハンディー型対応センサーの開発、15)パイプライン処理を用いた信号・画像処理の高速化、16)ミリ波パッシブ撮像装置製品モデル機の開発製造

・実績

計画の1)～16)の各項目につき、以下成果を得た。

1) 従来のリアルタイム校正法を拡張した新規校正法を提案し、人体との温度差が小さい物体の検出特性の改善効果を確認した。
2) 固定ピッチの素子アレーを像面で走査して撮像実験を実施し、空間分解能の上限および適正な撮像距離を評価した。
3) 装置外部の温度情報およびセンサー間の相関関係等を利用してイメージング素子毎の増幅率変化をテーブル化し、静的にバラツキを補正した。
4) LNAの低雑音化のため専用MMICの設計を行った。
5) パラボラ反射鏡の光学系シミュレーションを行い、収差についてレンズ方式の優位性を確認した。
6) パラボラ反射鏡による軽量化を検討し、軽量化の見通しを得た。しかしながら光学系シミュレーション

の結果から、収差についてレンズ方式の優位性が判明した。そのため11)のフレネルレンズの利用を検討し、軽量化を達成した。

7) 平面鏡を用いた多段反射方式により機器の小型化を達成した。
8) USB3.0 高速インターフェースの実現可能性を調査し、小型を前提とした基本仕様について検討し、USB2.0 で実現した方が有利な事がわかった為、次年度に高速インターフェース基板開発に着手することを決定した。
9) 小型イメージング装置の試作機を開発し、成田空港内において夏期にフィールド実験を実施した。また、テロ対策特殊装備展会場の一般的な環境でも実施し、機内持ち込み禁止物、液体、固形物等を用いた撮像実験の結果を踏まえ、信号処理・画像処理部の改善、改良を行い、不審物の視認性能を向上した。
10) 近傍センサー方式およびレンズ方式による小型撮像システムを試作し撮像実験を行った。近傍センサー方式では近距離での高分解能、近傍レンズ方式では安定した信号波形を特徴として得た。
11) 小型フレネルレンズを設計し、薄型化による機械的強度向上策を含む基本特性を電磁界解析により検討した。試作した大型フレネルレンズは非球面レンズの重量約30kgから約3kg程度まで軽量化され、感度の低下が約1dBであることを確認した。
12) 近傍センサーを用いた検出方式を検討し、センサーから被写体の距離5.3cmの条件で電波吸収体の前面に配置した金属、セラミック、粉末、プラスチックが検出可能との結果を得た。
13) 11)の実験結果を踏まえ、アンテナ近傍の電磁界解析を行った。
14) ハンディー型対応センサーの設計を行った。
15) パイプライン処理を用いた信号・画像処理回路の設計を行った。
16) ミリ波パッシブ撮像装置製品モデル機の製作を行った。

b. 平成23年度（技術開発期間2年目）

・計画

1) イメージング素子アレーの最適配置設計のためのメカシリンダを用いた基礎実験および数値シミュレーション、2) 高画質化のためのイメージング素子アレーの最適配置設計、3) イメージング素子用温度測定／補正回路の開発、4) LNA の低雑音化を目的とした専用 MMIC を設計開発および設計評価検証、5) 小型撮像モジュールとハンディー型に対応したインターフェースの開発、6) 軽量化筐体の開発、7) 近傍界イメージングの実験、8) 小型レンズアンテナの基礎実験、数値シミュレーション、及び設計、9) 小型レンズに代わる近傍検出器の数値シミュレーションと近傍界映像化方式の検討・開発、10) ハンディー型対応センサー開発、11) パイプライン処理を用いた信号・画像処理の高速化開発、12) 小型軽量化された据え置き型装置のプロトタイプ装置設計・製作・評価、13) ハンディー型装置のプロトタイプ装置設計

・実績

計画の 1)～13)の各項目につき、以下成果を得た。

- 1) ピッチ 8 mm のイメージング素子アレーをメカシリンダで掃引/画像合成を行い、分解能の上限を確認した。
- 2) さらなる高分解能を得る目的で、1次元アレー2枚を 4 mm ずらして配置した千鳥配列により素子間隔を短縮したアレーモジュールを試作・検証した。その結果、現行の装置よりも高い分解能が得られる見通しを得た。
- 3) 装置外部の温度情報を取得して表示するとともに、アプリケーションソフトウェアによりセンサーの温度補償回路を実現した。イメージング素子個々のバラツキを吸収するために、センサー間の相関関係等を利用してイメージング素子毎に増幅率を変化させたテーブルを用意し、静的なバラツキの補正を実現した。
- 4) 専用 MMIC の開発において、周波数帯域幅を従来の 2 倍まで達成した。
- 5) ハンディー型で使用する 6 センサー対応小型撮像モジュール(基板)を開発、PC を接続して稼働を確認し、ハンディー型での使用準備を整えた。また、ハンディー型用に開発した小型撮像モジュールを壁型装置に実装可能であることを確認した。
- 6) 小形・軽量振動リフレクタおよび多段レンズの同時可動機構を設計・試作する等、筐体構成部品の軽量化に務めた。また、壁型装置の構造案を確定し、実験用装置の開発を開始した。
- 7) 実験用ハンディー型筐体を設計・試作し、主に小型レンズ方式についてシールド性、距離特性、安定性に関する基礎特性を得るとともに、検知信号処理の基本方式を確立した。
- 8) ハンディー装置用小型非球面レンズを設計・試作し、受信電圧が最大となる条件を得た。また、壁型装置に用いる口径 270 mm のフレネルレンズを設計・試作し、軽量のフレネルレンズアレーを機械的に走査し、分解能を高めるレンズシステムを新たに考案した。
- 9) レンズを使わない近傍界検出方式では高分解能が得られるものの、センサーと被写体の距離が 30 mm を超えると受信電圧が大幅に低下し、不安定になる問題を確認されたので、レンズを用いる方式に改め小型レンズの開発を進めた。
- 10) 耐久性を考慮した導波管型検出器を開発した。

- 11) データ処理、画像処理、描画に関するハードウェア、ソフトウェアの構造を再検討し、より高速化が可能なパイプライン処理を活用し、処理方法を修正した。
- 12) 据置き装置の第 1 バージョンの製品化を終了し、マスプロ電工より販売開始した。また、主に導体の検知特性を改善可能な順光パッシブイメージング法を提案し、反射率の高い物体の検知に有効であることを実験的に確認した。
- 13) ハンディー型装置のプロトタイプ装置の筐体及び内部構造について協議検討し、構造の概要を明らかにした。

c. 平成 24 年度 (技術開発期間 3 年目)

・計画

1) ミリ波画像を用いた物体認識と評価、2) イメージング素子用温度測定／補正回路の開発、3) イメージデータ収集とミリ波強度測定、4) 反射鏡と振動リフレクタの設計法確立、5) 軽量化筐体の開発、6) 小型レンズに代わる近傍検出器の数値シミュレーションと近傍界映像化方式検討・開発、7) パイプライン処理を用いた信号・画像処理の高速化、8) ハンディー型装置のプロトタイプ装置の設計製作・装置評価、9) 壁型装置のプロトタイプ装置設計製作、10) 小型化・軽量化された据え置き型装置の長期実証試験

・実績

計画の 1)～10)の各項目につき、以下成果を得た。

- 1) 据え置き型装置向けにオフライン処理による物体認識の基本処理ソフトウェアの作製、評価と機能・性能面での問題点、改良点の抽出を行った。その結果、空間分解能に応じた基本形状を認識することができた。
- 2) 装置外部の温度情報およびセンサー間の関係を再検討した結果、動的にバラツキを補正可能な相関関係が得られないことが判明した。そのため絶対的な温度測定は行わないこととし、各種リアルタイム補正をもとにした正規化による補正回路を中心に使用していくことを決定した。
- 3) 開発したイメージング装置を用いて種々の物体を人体表面に装着したときのミリ波強度を測定した。その結果、周囲環境の熱放射がイメージの劣化を引き起こすこと、および物体の電気特性に応じた視認性の変化等、様々な知見を抽出することができた。
- 4) 装置の容積が最小となる振動リフレクタおよびコーナーリフレクタの配置方法を求め、これに基づいた設計法を確立した。さらにわずかなデッドスペースに制御用電気系統を収納する等の工夫により装置全体の小型化を達成した。
- 5) 据え置き型装置において既に開発した製品に比べて約 54%の重量まで軽量化した。ハンディー型装置では 1.3 kg までの軽量化を達成し、さらなる軽量化を進めた。
- 6) レンズを使わない近傍界検出方式では被写体距離の増加に伴い受信電圧が大幅に低下する問題があったため、レンズを使用する方式を採用した。ハンディー型装置では必ずしもイメージを得る必要がないことから、LED 等を用いて物体の有無を知らせる方式とした。
- 7) ハードウェア化が比較的容易な積分処理および画像転送処理を、FPGA 等の専用のハードウェア回路によるパイプライン処理に移行することにより処理速度の向上を実現し、撮像の高速化を達成した。

- 8) ハンディー型装置プロトタイプを試作し、出力電圧の信号処理により物体検知を LED で知らせる機能を実現した。
- 9) 壁型装置の光学系等の構造上の課題抽出、画像化アプリケーションの開発を経て壁型装置プロトタイプを開発し、レンズ上下動機構によるセンサー数の大幅な減少を達成した。
- 10) 小型化軽量化装置の長期エージング確認のために従来装置の部分品を使用して長期エージング試験を継続して行った。また、オフライン処理による機能・性能面での課題・改良点の抽出を並行して行った。

d. 平成 25 年度（実証期間 1 年目）

・計画

- 1) 冷却順光イメージング技術を利用したブース型装置の開発、2) センサーの性能向上、3) 不審物検知アプリケーション、4) ミリ波画像を用いた物体認識と評価、5) イメージデータ収集とミリ波強度測定、6) プロトタイプの評価、表示系の充実、7) 改良センサー、冷却順光法の搭載による性能向上確認、不審物検知アプリケーションの搭載、8) プロトタイプ装置評価、改良点の抽出と修正研究開発、9) 実験結果に対応した修正、研究開発とその反映、10) プロトタイプ装置評価、改良点の抽出と修正研究開発、11) 実験結果に対応した修正、研究開発とその反映、12) 特許権利化、13) 実証試験 I

・実績

計画の 1)～13)の各項目につき、以下成果を得た。

- 1) 据え置き型装置に接続可能な冷却水壁ブースを開発し、周囲環境が放射しているミリ波帯熱雑音の遮断および冷却水壁からの低熱雑音ミリ波の照射により主に導体の検知特性を大幅に改善した。一方、冷却順光技術を利用してハンディー型装置における不審物の検知特性が向上する知見が得られ、本技術の応用展開が順調に進んだ。
- 2) ミリ波センサーにおいて、従来の FR4 基板上に MMIC、検波器を配置する方式から、熱結合の良い金属プレート上に配置する方式を新たに考案し設計を行なった。これにより、発熱の大きなデバイスの放熱が良好となり、温度上昇が抑えられ、その結果として、長周期温度ドリフトと温度分解能が向上した。
- 3) 電磁環境の変化に対する画像データを収集し、不審物マーカの基本性能をオフライン処理により詳細に評価することで物体の材質、形状および大きさおよび外乱ノイズに対する性能を体系的に抽出した。
- 4) 据え置き型装置向けにオフライン処理による物体認識の基本処理ソフトウェアの作製、評価と機能・性能面での問題点、改良点の抽出を行った。その結果、ユーザー立ち合い試験実施項目と意見収集結果も踏まえて、次年度の実証試験に向けた検知性能の感触、及びオンライン処理への移行の見通しを立てられた。

- 5) 外乱ノイズ、周囲温度、被験者等が変化した場合の膨大なデータ収集を行い、各種条件に対するデータの分類を進めた。その結果、周囲温度よりも外乱ノイズの影響が主要な画質低下の原因であることが明らかとなった。
- 6) 据え置き型プロトタイプの改良・課題抽出を 3 回実施し、各プロトタイプの特性を検証するとともにユーザー環境試験において使用する装置の開発を行った。また、ユーザー立ち合い試験を 5 回実施してアンケート等により性能評価を進め、評価結果を可能な限り反映させた装置となるように努めた。
- 7) 改良型センサー、冷却ブースおよび不審物検知アプリケーションを実装した据え置き型検知システムを構築して性能評価を進めた。その結果、不審物の高い検知性能が達成された。
- 8) ハンディー型プロトタイプの改良・課題抽出を 3 回実施し、各プロトタイプの特性の検証結果をもとにユーザー環境試験で使用する小型・軽量化ハンディー型装置を開発した。また、ユーザー立ち合い試験を実施してアンケート等により性能評価を進め、評価結果を可能な限り反映させた装置となるように努めた。
- 9) 最終型ハンディー型装置プロトタイプの特性評価を進めるとともにユーザー環境試験で使用する検知ソフトウェアの調整を実施した。
- 10) 壁型プロトタイプの改良・課題抽出を 2 回実施し、各プロトタイプの特性を確認した。また、ユーザー立ち合い試験を実施してアンケート等により性能評価を進め、評価結果を可能な限り反映させた装置となるように努めた。
- 11) 最終型の壁型装置プロトタイプの特性評価を進めるとともにユーザー環境試験で使用する検知ソフトウェアの調整を実施した。
- 12) 主にハンディー型装置の特許の権利化を進めた。
- 13) 航空保安・警察業務に携わっているユーザーの立ち合い試験を実施し、開発した①据え置き型装置、②壁型装置および③ハンディー型装置のアンケートを個別に実施することにより各装置の課題の抽出および装置の改良を実施した。また、模擬爆発物検知試験を実施し、いずれも画像の視認による検知が可能であるとの結果を得る等、開発装置の性能確認も順調に進んだ。

e. 平成 26 年度（実証期間 2 年目）

・計画

- 1) 冷却順光イメージング技術を利用したブース型装置の開発、2) センサーの性能向上、3) 不審物検知アプリケーション、4) イメージデータ収集とミリ波強度測定、5) プロトタイプ試作、6) 改良センサー、冷却順光法の搭載による性能向上確認、不審物検知アプリケーションの搭載、7) 実験結果に対応した修正、研究開発とその反映、8) 改良型装置製作、商品化準備、9) 実験結果に対応した修正、研究開発とその反映、10) 特許権利化、11) 実証実験 II (短期)、12) 実証試験 II (長期)

7. 年次計画

取組内容	1年度目	2年度目	3年度目	4年度目	5年度目
要素技術の確立 高画質・高感度化・性能改善	リアルタイム校正法の改良 イメージング素子アレーの最適配置設計のためのメカシリンダを用いた基礎実験および数値シミュレーション	高画質化のためのイメージング素子アレーの最適配置設計		冷却順光イメージング技術を利用したブース型装置の開発 センサーの性能向上 不審物検知アプリケーション	
		イメージング素子用温度測定/補正回路の開発	ミリ波画像を用いた物体認識と評価		
	LNAの低雑音化を目的とした専用MMICを設計開発および設計評価検証		イメージデータ収集とミリ波強度測定		
小型化・軽量化	反射鏡の軽量化・小型化・収差最適化のための数値シミュレーション 反射鏡による軽量化・小型化・収差最適化の設計・試作、多段反射方式光学系の検討		反射鏡と振動リフレクタの設計法確立		
	光学系の多段反射方式の開発				
	小型撮像モジュールとハンディー型に対応したインターフェースの開発				
		軽量化筐体の開発			
壁型装置およびハンディー型装置用 小型撮像モジュール	近傍界イメージングの実験 小型レンズアンテナの基礎実験、数値シミュレーション、及び設計				
	壁型装置開発のための近傍検出器開発 小型レンズに代わる近傍検出器の数値シミュレーションと近傍界映像化方式検討・開発				
	ハンディー型対応センサー開発				
	パイプライン処理を用いた信号・画像処理の高速化				
総合システムの開発 ミリ波パッシブ撮像装置商品化				プロトタイプの評価、表示系の充実	プロトタイプ試作
① 小型化・軽量化された据え置き型装置	製品モデル機の開発製造			改良センサー、冷却順光法の搭載による性能向上確認、不審物検知アプリケーションの搭載	
② ハンディー型装置	プロトタイプ装置設計製作	プロトタイプ装置評価	プロトタイプ装置評価、改良点の抽出と修正研究開発		実験結果に対応した修正、研究開発とその反映
③ 壁型装置		プロトタイプ装置設計製作	プロトタイプ装置設計製作	プロトタイプ装置評価、改良点の抽出と修正研究開発	改良型装置製作 商品化準備
					実験結果に対応した修正、研究開発とその反映
					特許権利化

