

4.空港面異物監視システムの異物検知性能評価

監視通信領域 ※米本 成人，河村 暁子，ニッ森 俊一，森岡 和行

1 まえがき

2000年に仏国シャルルドゴール空港で発生したコンコルドの事故[1]以来、滑走路等上の異物（FOD）は非常に重要な空港安全の課題の一つとして認識が高まっている。また、バードストライクなどの突発的な事象は、FODの除去や滑走路の安全確認までに多大な手間と点検時間を発生させることになる。こうした事態は、航空機の離着陸を制限することから、空港の処理能力や運用効率を低下させる重大な要因となっている。このような背景の下、空港面の状態を監視するシステムへの要望が高まり、世界的に様々なFOD検出システムが提案されている。FOD検出システムの性能は滑走路の安全性に関わる重要な設備であるため、米国連邦航空局（FAA）のアドバイザリーサーキュラー（AC）[2]や、欧州航空機器機関（EUROCAE）の最低航空システム性能規格（MASPS）[3]等にて、性能規格が定められている。FOD検出システムのセンサーとして、ミリ波レーダーは微小な金属製FODを検出するため有望であるが[4, 5]、FODの検出精度や測定にかかる時間を短縮する、一つのセンサーで監視できる範囲を広げる等の技術的課題があった[6]。

当研究所では、空港運用者のニーズを踏まえ、単に異物の有無による警報を発出するだけでなく、その外形や特徴が認識可能な空港面異物監視システムに関する研究を行っている。複数のミリ波レーダーをから構成されるレーダーネットワークと超高感度ITVカメラネットワークによるハイブリッドセンサーネットワークを用いて、異物検出だけでなく、センサー情報からより確度の高い警報を生成するための技術を開発している。

本稿では、ハイブリッドセンサーシステムの性能評価と、成田空港にて実施した異物の検出性能試験を行った結果について紹介する。

2 空港面異物監視システム

空港面などの広大な監視範囲をミリ波レーダーで常時監視し、異物の発生をとらえ、その異物の形状が認識できるよう、自動的にその映像を表示するシステムを構築する。図1にシステムの概念図を示す。

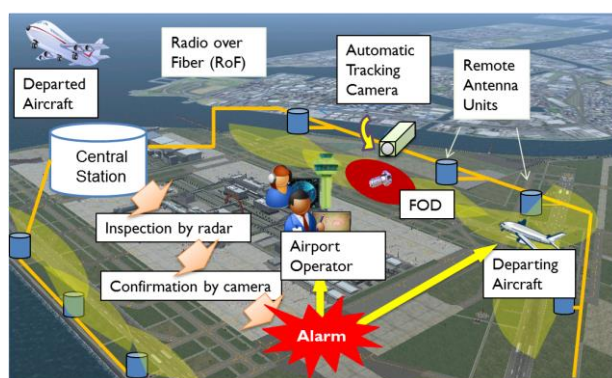


図1 空港面異物監視システムの概念図

ミリ波レーダーは波長が短く、波長に比べて相対的に大きな金属片に対して良好な反射特性を持つ。しかし、波長の短い電波は自由空間伝搬減衰が大きく、波長の長い電波と比較して、電子回路で高い出力が得られにくい。よって、1つのレーダーで監視できる範囲が小さくなる。そこで、監視範囲を分割し、一つ一つの範囲をアンテナ装置で受け持ち、複数のアンテナ装置を光ファイバーで接続した中央装置で制御する構造のミリ波レーダーを開発し、監視範囲を拡張できることを示した[7-10]。レーダーでは物体の有無は判定できるが、その物体の形状を認識するため、レーダーが検知した部分を自動的に制御して撮影する自動追跡カメラを導入したハイブリッドセンサーシステムを構築する。これにより、常時ミリ波レーダーで監視し、発見した異常箇所を自動的にカメラで撮影することで、空港運用者が離れた滑走路の状態を瞬時に把握できる構造としている。

3 光ファイバー接続型ミリ波レーダー

ミリ波のような高周波を同軸ケーブルなどの金属線で分配するとき、その伝送損失が大きく、適切に信号を分配することは難しい。そこで、送信信号を光信号に重畳し、光ファイバー内を伝送する。このとき、通常の光ファイバー無線では、重畳する無線信号の周波数、および伝送距離によって、ファイバー内の波長分散の影響から、伝送先で信号が取り出せない現象が発生する。この問題を解決するため、光搬送波抑圧両側波帯信号を生成している。図2にその原理を示す。

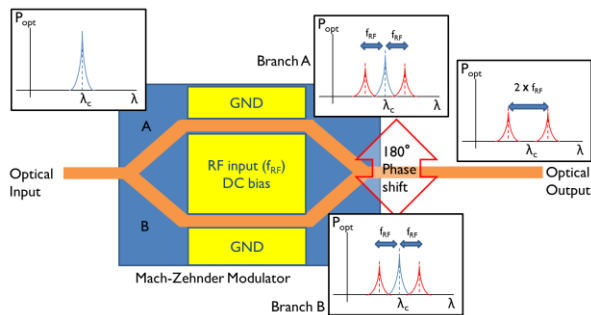


図2 光搬送波抑圧両側波帯信号

レーザー光に無線信号を重畳するため、マッシュエンダー型の光変調器を用いる。光変調器に強度変調を加えるとき、入力光（光搬送波）の両側に光側波帯信号が発生する。光変調内部の分岐路にてそれぞれ同電力で分配した光信号の片側に、光搬送波の位相差が180度となるように位相遅れを与えると、合成された光出力の搬送波が消失する。この両側波帯信号のみを用いると、無線信号は入力信号の2倍となり、ファイバー内の波長分散の影響を取り除くことができる。これにより、高周波信号を光ファイバーで長距離伝送することができる[9,10]。

この光搬送波抑圧型両側波帯ファイバー無線装置を利用して、90GHz帯のミリ波レーダーシステムを構築した。図3にシステムブロック図を示す。中央装置側はFMCW信号源、レーザー光源、光変調器、光増幅器、光分配器で構成される。FMCW信号源では16GHzのFMCW信号を生成し、光変調器でレーザー信号に重畳する。生成した光信号は、光搬送波を抑圧して増幅した後、4等分される。成田空港内の光

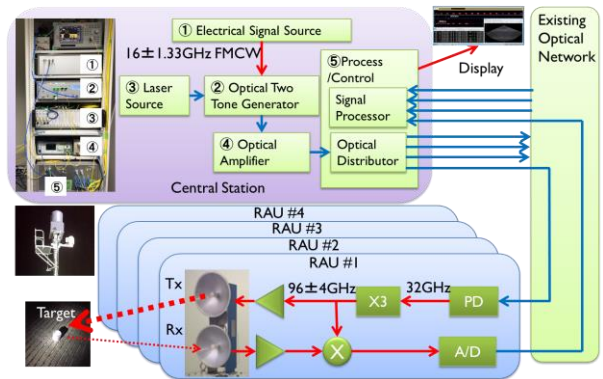


図3 光ファイバー接続型ミリ波レーダーのシステムブロック図

ファイバーネットワークを介して、光信号はB滑走路北側着陸帯を取り囲むように設置された4つのアンテナ装置に送られる。光信号はそれぞれのアンテナ装置内で、電気信号変換される。このとき、入力信号の2倍の32GHzの無線信号が得られる。その信号をアンテナ装置内の電気回路で3通倍し増幅して、高利得アンテナから外部へ放射する。物体に反射されて戻ってくる微小な電波を受信後に増幅し、送信信号の一部と混合して低い周波数に変換する。その低周波信号をデジタル信号に変換して中央装置へ転送する。アンテナ装置から送られてくるデジタル信号から周波数分析して物体までの距離を計算して、角度情報に基づきレーダー画像を生成する。各アンテナ装置は、中央装置で制御されて4秒に1回の割合で機械的に回転しており、内部スイッチにより測定タイミングを時分割することでそれぞれのアンテナ装置からデータを取得する構造となっている。

図3にレーダー装置の表示例を示す。各アンテナ装置から得られるレーダー画像から、測定における周辺ノイズと比較して高い値を物体と

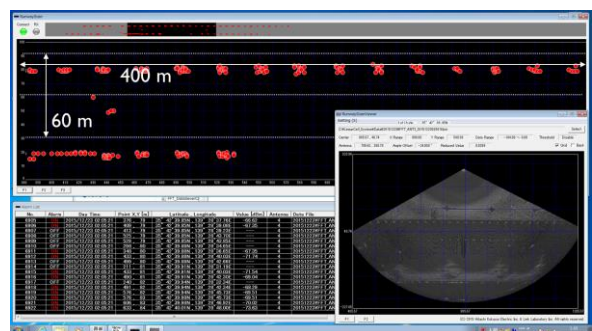


図4 レーダーシステムの表示例

判定する定誤警報確率処理を行う。加えて、移動している物体やランダムに発生するノイズ成分を除去するため、4秒置きに繰り返し転送されるレーダー画像から、2回連続で検出された物体のみを抽出する。あらかじめ設定した監視範囲内にて複数回連続で検出された物体を異物と判定し、異物検出結果（緯度、経度、反射波の強度等）を記録する。

今回のアンテナ装置は直径 20cm のカセグレアンテナ（ビーム幅約 1 度）を使用している。そのことから、レーダー画像に表示されているように、距離測定精度と比較して大きな横方向に線状の誤差（アジマス誤差）が発生する。この誤差を低減するため、現在は複数のアンテナ装置のデータを処理することで位置精度やレーダー画像の高精度化を検討している。複数のアンテナ装置を協調して動作させれば、同じ物体を異なる角度から測定することができる。このデータを用いると、同じ物体からの反射信号は複数のアンテナ装置で得られたデータが表す線の交点として表現できる。また、同じ物体からの反射波でもアンテナ装置からの距離や角度が異なることから、信号の強度にばらつきがあり、微弱な反射信号は埋もれて見づらくなる。

そこで、縦、横の座標に加え、レーダー信号を高さ、色で疑似的に 3 次元的な描画を行う。その一例を図 5 に示す。これらの強調処理を加えることで、微弱な信号や異物の 2 次元的な位置がより鮮明に識別できる可能性が示された。今後は、これらの先鋭化処理をリアルタイムに計算できる手法を検討し、表示方法、異物判定などの処理に組み込んでいく。

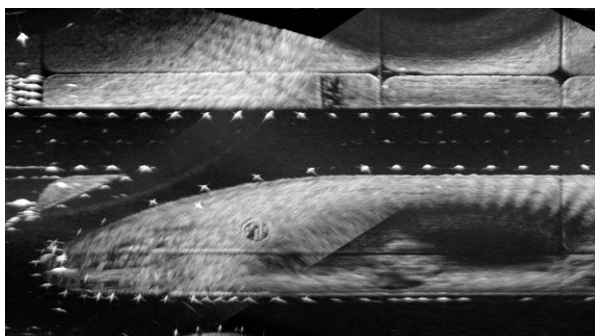


図 5 高解像度レーダー画像生成処理の一例

4 超高感度 ITV カメラの開発

ミリ波レーダーでは異物の有無は判定できるが、電波の散乱情報だけでは異物の形状等、詳しい情報を得ることは困難できない。そこで、レーダーで検出した異物を追跡して、離れた場所から空港管理者が滑走路上の異物の外観を認識できるような自動追跡カメラシステムを構築する。

滑走路表面に落下した物体を撮影するためには、空港の転移表面以下で、できる限り高い位置に設置することが好ましい。このとき、カメラは滑走路中心線から 200m 以上離れて設置されることとなる。日中であれば距離は問題ないが、夜間に滑走路上の微小物体を撮像するためには性能向上が必要となる。そこで、既製品のカメラと開発品の 2 種の高感度 ITV カメラを用いて夜間の異物検出性能評価を行った。使用したカメラの諸元を表 1 に示す。

高感度カメラは周辺が暗くなると、自動的に撮影された動画の画素を積分する蓄積モードに切り替わる構造となっている。既製品カメラは撮像素子が 1 枚であるため、照度が低いときはグレースケールの画像となる。一方、開発品は赤、緑、青にそれぞれ感度を持つ撮像素子でカラー画像を生成するため、暗い中でも物体の色が再現できる。図 6 に使用した異物検出テストサンプルを示す。

表 1 使用したカメラの諸元

| | 既製品 | 開発品 |
|-------|------------------------|------------------------|
| 撮像素子 | 1/2.8 CMOS | 1/2.86 CMOS |
| 素子数 | 1 | 3 |
| 画素数 | Full HD (1920x1080) | Full HD (1920x1080) |
| ズーム倍率 | 最大 30 倍 | 最大 35 倍 |

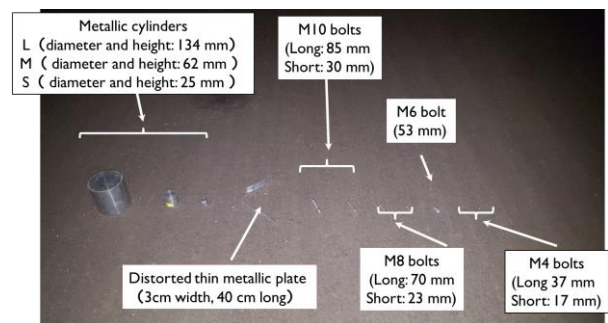


図 6 使用した異物検出テストサンプル

3種の標準反射体（小，中，大），細長い金属板，7種の様々な大きさのボルトの計11種のサンプルを夜間の仙台空港滑走路に設置し，異物を100mから800mまで移動させて，それぞれの2種の高感度ITVカメラで撮影した画像を分析した。図7にカメラから200m離れた位置に異物サンプルを配置した場合の既製品カメラの撮影結果の一例を示す。

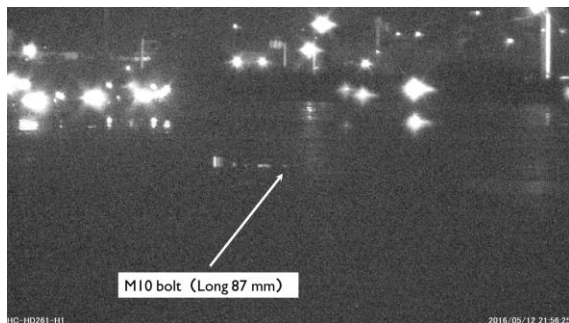


図7 既製品カメラの異物サンプルの撮影例

既製品カメラの場合，200m距離が離れると，FAAのAC[2]に規定された標準反射体（小，高さ1インチ，幅1インチの金属円柱）が認識できる限界となった。400mほど離れると，すべての物体がほぼ視認できない結果となった。これらの試験結果から，場周道路付近にカメラを設置することを想定した場合にカメラの感度が不足していることが示された。

次に開発品カメラの400m離れた位置に異物サンプルを配置した場合の撮影結果を図8に示す。開発品カメラの場合は暗闇に埋もれた物体の色も含めて明瞭に撮影が可能であり，直径約8mmのM4ボルトの頭を含め，すべての物体を確認することができた。異物までの距離を変えて撮影した結果，M4ボルトは約400m，標準反射体（小）では500m離れていても検出可能であることが示された。



図8 開発品カメラの異物サンプルの撮影例

5 ハイブリッドセンサの接続試験

平成27年度に成田空港に設置した光ファイバー接続型ミリ波レーダーと接続動作を行うため，平成28年度は開発した超高感度カメラを成田空港B滑走路脇のレーダーの下に設置した。設置に際して耐環境性を確保するため，防水ケースに収納し，構内ネットワークを經由してレーダーの中央装置脇で制御が可能な構造とした。図9に改修した空港面異物監視用ハイブリッドセンサーシステムの概要を示す。

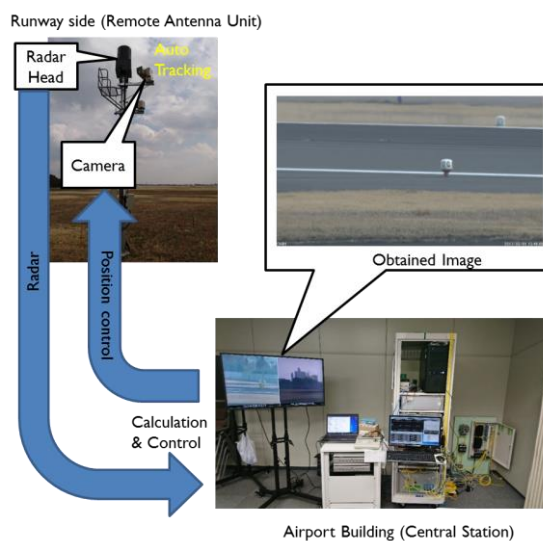


図9 ハイブリッドセンサの概要

ILS局舎付近に配置したレーダーの下にカメラを配置し，レーダーが検出した異物の滑走路上の座標を基に，カメラの撮影角度（パン，チルト角）および適切なズーム倍率および焦点調整を実施する構成とした。

設置したカメラの性能を確認するため，深夜の成田空港でカメラの性能確認を行った。図10に暗闇の中にある樹木を撮影した結果を示す。目視や通常のカメラでは全く見ない風景が，色も含めて明瞭に撮影できることが示された。また，画角の外に位置する樹木付近に位置する灯火の影響により，防水ケースとカメラレンズ間で多重反射が発生し，偽像が撮影された。これについては，防水ケースの窓材に反射低減皮膜処理を施す等，反射低減改善の必要がある。次にズーム性能を評価する。図10の中央付近のフェンスを最大倍率で撮影した映像を図11に示す。



図 10 深夜における成田空港脇の樹木の撮影結果



図 11 光学 35 倍ズームで撮影した、図 10 中央部分の拡大撮影結果

樹木の手前に設置された制限区域を隔てるフェンスが、金網も含めて明瞭に撮影できている。これらの試験結果より、全く光のない環境下で最大のズーム倍率で撮影した場合においても、明瞭に物体の色、形状が識別できる能力があることが示された。

次に、レーダーとカメラの接続動作の結果を示す。ハイブリッドセンサーシステムは、レーダーの異物判定処理で異物検出されたとき、カメラ制御ソフトウェアに異物位置情報を転送する。レーダーの設置場所とカメラの設置場所に柔軟性を持たせるため、センサー間で受け渡す情報は滑走路上の 2 次元座標に変換して転送している。レーダーから転送された異物の座標位置を撮影するようにカメラの回転角を計算し自動で撮影を行う。滑走路上に小、中、大の金属片をカメラから約 400m 離れた位置に配置した場合の側撮影結果を図 12 に示す。

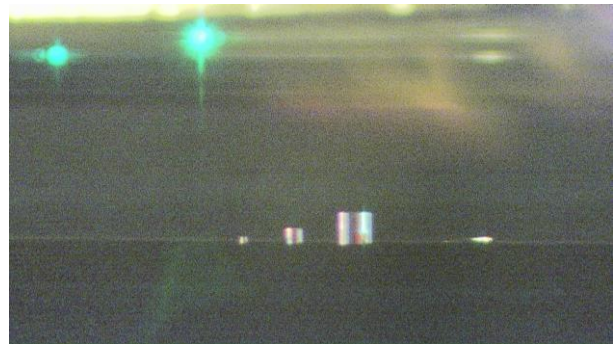


図 12 標準反射体（小，中，大）の自動検出撮影例

背景に空港灯火や、画角外の光源の偽像が撮影されているが、配置した異物サンプルが明瞭に確認できる。また、標準反射体（小）のみを配置した場合、カメラを金属柱に固定する冶具が回転によって上下振動し、異物が消失する現象が生じた。このことから、高感度カメラの設置方法を改良し、ズーム倍率が高いときに問題となる微小な振動を抑制する必要性が示された。

最後に標準反射体（小）を用いて、撮影限界を確認した。カメラから約 350m 付近に設置した標準反射体の自動検出撮影結果を図 13 に示す。先に述べた、現在の振動が残留している状況下において、小さい物体が明瞭に識別できることが示された。



図 13 350m 離れた位置に配置した標準反射体（小）の検出例

これらの結果から、いくつかの設置・施工方式に起因する性能劣化は確認されたが、開発の第一段階として、微小金属片等の異物検出性能は達成された。また、1 分程度の時間を要する諸外国の製品に比べて異物の発生から撮影までの速度を 10 秒前後と高速化することができた。

6 まとめ

本稿では、ミリ波レーダーと高感度カメラを連動したハイブリッドセンサを用いた滑走路異物監視システムの開発を紹介した。成田空港で実施した。試験結果では1インチ程度の金属片を検出し、夜間でも明瞭に撮影する能力が達成できたことが示された。今後は悪天候時の性能劣化や、レーダーで捕捉しづらい鳥の死骸などの非金属物体の検知確率向上について研究を行う

謝辞

本研究の一部は、総務省「90GHz 帯リニアセルによる高精度イメージング技術の研究開発」として実施された。また、本研究は、株式会社日立製作所、国立研究開発法人情報通信研究機構、公益社団法人鉄道総合技術研究所の共同研究として実施された。高感度カメラの開発については、株式会社日立国際電気との共同研究として実施された。

参考文献

- [1] BEA Report translation, “Accident on 25 July 2000 at La Patte d’Oie in Gonesse (95) to the Concorde registered F-BTSC operated by Air France,” f-sc000725a, Jan. 2002.
- [2] FAA, “Airport Foreign Object Debris (FOD) Detection Equipment”, Advisory Circular, AC150/5220-24, Federal Aviation Administration, U. S. Department of Transportation, September 30, 2009
- [3] European Organization for Civil Aviation Electronics, “Minimum Aviation System Performance Specification for Foreign Object Debris Detection System,” ED-235, Mar. 2016.
- [4] P. D. L Beasley, G Binns, R. D. Hodges, and R. J. Badley, “Tarsier, a Millimeter Wave Radar for Airport Runway Debris Detection”, Proceedings of EuRAD 2004, pp. 261-264, Amsterdam, 2004.
- [5] P. Feil, W. Menzel, T. P. Nguyen, Ch. Pichot, C. Migliaccio, “Foreign Object Debris Detection (FOD) on Airport Runways Using a Broadband 78 GHz Sensor”, Proceedings of EuRAD, Amsterdam, October 2008.
- [6] N. Yonemoto, A. Kohmura, S. Futatsumori, Tetsuji Uebo, and A. Saillard, “Broad Band RF Module of Millimeter Radar Network for Airport FOD Detection System”, Proceedings of International Radar Conference (RADAR’09), Bordeaux, France, Oct. 12-16, 2009
- [7] N. Yonemoto, A. Kohmura, S. Futatsumori, “Development of wide band millimeter wave radars connected by optical fiber”, IEICE Technical report, Vol. 112, No. 280, MWP2012-48, pp. 11-15, 2012 (in Japanese)
- [8] S. Futatsumori, K. Morioka, A. Kohmura, K. Okada and N. Yonemoto, “Fundamental field evaluations of Radio-over-Fiber connected 96 GHz millimeter-wave radar for airport surface foreign object debris detection,” Proc. of the 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, pp.1-2, Aug. 2015.
- [9] S. Futatsumori, K. Morioka, A. Kohmura, K. Okada and N. Yonemoto, “Design and Construction Methodology of 96 GHz FMCW Millimeter-Wave Radar Based on Radio-over-Fiber and Optical Frequency Doubler,” Proc. of the 2015 IEEE International Topical Meeting on Microwave, Oct. 2015
- [10] S. Futatsumori, K. Morioka, A. Kohmura, and N. Yonemoto, “Design and Field Feasibility Evaluation of Distributed-Type 96 GHz FMCW Millimeter-Wave Radar Based on Radio-over-Fiber and Optical Frequency Multiplier,” IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 34, Issue 20, pp. 4835-4843, 2016