

平成 31 年 5 月 31 日

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

国土交通大臣 殿

(交付申請者)

所在地	〒225-8503 神奈川県横浜市青葉区鉄町 1614
機関名	桐蔭横浜大学
部署・職名	大学院工学研究科・教授
氏名	杉本 恒美 (印)

建設技術研究開発費補助金による以下の補助事業について、建設技術研究開発費補助金交付要綱第 17 条第 3 項の規定に基づき、下記を別紙にて報告します。

1. 課 題 名：非接触音響探査法による外壁調査の効率性向上に関する検討
2. 研究代表者：杉本 恒美 (桐蔭横浜大学・教授)
3. 交付決定額：10,000 千円
4. 交付決定日：平成 30 年 6 月 4 日 (国官技第 67 号)

記

1. 建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書【概要版】(別紙 1)
2. 建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書 (別紙 2)

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書【概要版】

- (1) 課 題 名：非接触音響探査法による外壁調査の効率性向上に関する検討
- (2) 研 究 期 間：平成 29～30 年度
- (3) 交 付 申 請 者 名：平岩 敬一（学校法人桐蔭学園・理事長）
- (4) 研 究 代 表 者 名：杉本 恒美（桐蔭横浜大学・教授）
- (5) 共 同 研 究 者 名：歌川 紀之（佐藤工業(株)技術研究所・上席研究員）
- (6) 補 助 金 交 付 総 額：20,000,000 円

(7) 技術研究開発の目的

音源搭載型 UAV (Unmanned Aerial Vehicle) およびそれを用いた遠距離非接触計測システムを開発することにより、従来の非接触音響探査法を改良して、外壁調査の効率性を格段に向上させることができる計測システムを開発することを目的とする。

(8) 技術研究開発の内容と成果

平成 29 年度は音源搭載型 UAV の開発（試作）および外壁供試体の製作を行った上で、当初の構想どおり、UAV に搭載できるような小型音源により非接触音響探査法が実施できるかどうかの基礎検証実験を実施した。

本研究開発のために試作した音源搭載型 UAV は、本体 (DJI Corp., Matrice 600 Pro) の下面に平面音源 (FPS Corp., 1030M3F1R)、照準用レーザーポインタ、レーザー距離計および FM 受信機等が装備されている。UAV 自体の重さは約 10 kg で、音源とアンプ等を搭載した状態で約 20 分間の飛行が可能である。また、音波照射加振の波形は FM 送信機より送信することができ、レーザドップラ振動計 (LDV:Laser Doppler Vibrometer) 側の測定と同期させることができる。またタイル張りの外壁供試体の全体の大きさは $2 \times 1.6 \times 0.2 \text{ m}^3$ であり模擬亀裂欠陥としては、厚さ 0.5 mm のスチレンシートおよび発泡シートを使用した。ただし、固定のため、スチレンシートは周囲 4 辺を、発泡シートは全面を厚さ 0.5 mm テープで躯体コンクリートに貼り付けられている。欠陥形状は正方形で、欠陥サイズは 50mm 角、100 mm 角、150 mm 角、200 mm 角の 4 種類で、シートの埋没深さはタイル表面から約 9 mm である。なお、一つのタイルの大きさは約 $45 \times 95 \times 7 \text{ mm}^3$ である。

最初に、音源を模擬欠陥部に正対させた場合の検証実験を行った。UAV は飛行させずに運搬用車両の後部に搭載した状態としたが、50～200 mm 角の全ての欠陥サイズが検出できることが判明した。このうち、欠陥サイズ 50 mm 角のたわみ共振周波数は 10 kHz 以上であったため、通常の叩き点検では見つけることが困難な欠陥である。

また、UAV を実際に飛行させた時には、風などの影響で UAV 自体が揺動することが予想される。しかしながら音波照射加振の場合、音源と欠陥位置が正対していなくても、欠陥位置が音源の指向性の範囲内であれば、欠陥検出自体は可能であると考えられる。そこで、次に外壁供試体の中央部に音波照射した場合の検証実験を行った。室内実験のため、UAV は高さ調整用の簡易台の上に配置して、100～200 mm 角の欠陥サイズに対応する周波数を含む波形を音波照射加振用として用いたところ、想定どおり、100～200 mm 角の欠陥を高速に探査可能であることが明らかになった（この実験時には 1 点当たり 0.4 秒）。

さらに、音源搭載型 UAV を実際に屋外で飛行させ、外壁供試体を探査する実験を実施

した。飛行させた高さは供試体の台車を含めた高さに合わせて 2 m 程度とし、音源と供試体間は約 2~3 m 程度となるようにした。この距離が曖昧な理由は、大型 UAV の場合、2 m 程度の低高度では UAV 自身のプロペラが巻き起こす風が地面に当たって戻ってくる影響で UAV 自体が揺動してしまうためである。実験中に UAV 自体は多少揺動したものの、音波照射が短時間であっても、欠陥位置が音源の指向性の範囲に入っていれば、欠陥検出は可能であることが確認できた。また、屋外実験のために音源とレーザドップラ振動計の位置を離すことができる。そのため、反射音波による影響が少なくかつ、周囲からの多重反射音等の影響も無い状況であり、極めて高速な計測が可能であると予測していたが、実際に 1 ポイント当たり約 0.26 秒の高速計測が実現可能であることも確認された。

平成 30 年度は前年度の検討結果を受けて、自機のプロペラ乱流を避けるために 4 m 以上に高度を上げた場合の 2 種類の実験を行った。一つ目は外壁供試体をクレーンで吊り下げて他のコンクリート供試体の上に配置した場合の基礎検証実験で、二つ目は実際のタイル張りの外壁を持つ南阿蘇村にある旧久木野庁舎における実構造物での探査実験である。

一つ目の基礎検証実験では、UAV の飛行高度は約 4 m であり、周囲の風の影響を受けながらの計測であったが、150~200 mm 角の欠陥については、特に問題なく検出された。100 mm 角の欠陥についてはスペクトルピークがノイズレベルに埋もれがちであったが、この原因は 100 mm 角の共振周波数が 3 kHz 台のため、音源からの指向性範囲が狭くなっている関係で、計測時の音源位置の影響を受けやすいためと考えられる。そのため、UAV の位置精度（現状は±1m）の改善は必要であると思われるが、計測時に加算平均処理をかけた上で、周波数軸上で共振ピークが存在するものだけを加算する信号処理（共振判定処理）を行うことにより 100~200 mm 角の欠陥すべてが検出可能であることが判明している。なお、屋外実験のため、反射音波や多重反射音波による影響も発生しないために、ノイズも大幅に低減可能である。

次に実構造物での探査実験では、UAV の飛行高度は約 8 m であった。実験結果からは、2 階の窓枠下に大きな欠陥部があることが検出された。これは事前の高所作業車を用いた打音点検結果とも傾向が一致しており、本手法が屋外の検査で実際に使用可能であることが実証された。一方で打音点検結果と異なる点については、LDV による計測位置に十分な音圧が加わっておらず欠陥部の加振が安定していなかったことが原因として考えられた。そのため、音圧を再調整して、欠陥が存在すると思われる領域のみを計測しなおした。その結果、打音点検とほぼ同様な傾向を示す結果を得ることができた。

なお、本手法では 1 ポイント当たり約 0.26 秒という極めて高速な計測が実現可能である。これは計測条件（測定間隔、音波照射加振用波形の時間長さ、加算平均回数）にも依存するが、一般的な打音計測の 50 m²/h を超える 62.5 m²/h の計測速度が達成できることを意味している（測定間隔約 70 mm、波形の時間長さ 60ms、加算平均無しの場合）。

(9) 論文発表等に関する件数

原著論文 (査読あり)	原著論文 (査読なし)	原著論文以外 (新聞・雑誌等)	その他 (パネル・ポスター等)	合計
2 件	10 件	1 件	0 件	13 件

(10) 知的財産権に関する件数

特許権 (取得)	特許権 (出願)	その他 (実用新案・商標等)	合計
0 件	1 件	0 件	0 件

(11) 成果の実用化の見通し

音源搭載型 UAV(試作機)と外壁供試体を用いた初期の検証結果は極めて優れたものであり、提案手法が叩き点検の代替手法として実用的に用いることができる可能性が高いこ

とを示している。基礎検証実験の結果からは現状の試作システムでも 150 mm 角以上の欠陥であれば、比較的簡単かつ高速に検出可能であることが明らかになった。また、100 mm 角の場合はノイズに埋もれがちであったが、これもデータ取得方法や信号処理を工夫すれば検出可能である。さらに、タイル外壁を持つ実構造物における結果からも、打音点検と同様な傾向の探査結果を短時間に得ることが可能であることが明らかになり、提案手法が外壁点検の効率化に極めて有効であることが実証された。

しかしながら、計測システムとして本当の意味で実用化するためには、GPS に依存した現在の UAV 機体制御では、UAV 自体の位置精度が ± 1 m と非常に低いために、スキャン密度にも依存するが 100 mm 角程度の欠陥を見落とす可能性があるという問題点がある。但し、これは 360 度プリズムを使用した測量システムによるフィードバック制御を導入すれば、UAV の位置精度は ± 15 cm 程度に向上することが判明しているため、将来的には改善されることが期待される。

また、現状では計測時の UAV 操作者の負担が大きいため、将来的には UAV の自律飛行機能もしくは自動制御による飛行機能が実際の点検作業に用いる場合には必要になると思われる。しかしながら、UAV の機体制御技術は日進月歩で進化しており、UAV の飛行機能自体の更なる進化も期待されていることから、それほど遠くない将来に実用システムが構築可能になることが期待される。

(12) その他

試作した音源搭載型 UAV の飛行可能時間は 20 分程度でしかないため、点検時間がそれ以上かかる場合にはバッテリー交換のために着陸する必要がある。点検の開始から終了までの間は飛び続ける方が作業効率が高まることから、現状のリチウムイオン電池より高性能の全固体電池の実用化が期待される場所である。