氏　名	金　澤　朗　蘭
学 位 の 種 類	博　士（　工学　）
学 位 記 番 号	博　甲　第　９４１２　号
学 位 授 与 年 月 日	令和２年３月２５日
学位授与の要件	学位規則第４条第１項該当
審 査 研 究 科	システム情報工学研究科
学位論文題目	能動制御を用いた機械発生音における卓越騒音の低減に関する研究

主　査	筑波大学　教　授	工学博士	水谷　孝一
副　査	筑波大学　准教授	博士（工学）	海老原　格
副　査	筑波大学　准教授	博士（工学）	若槻　尚斗
副　査	筑波大学　助　教	博士（工学）	善甫　啓一
副　査	筑波大学　助　教	博士（工学）	前田　祐佳
副　査	筑波大学　教　授 （数理物質科学研究科）	工学博士	伊藤　雅英
副　査	国研・土木研究所　主任研究員	博士（工学）	吉永　弘志

論　文　の　要　旨

本研究は、機械から発生する特に低音域の卓越騒音の低減によって不快感を軽減することを目指したものである。軽減する対象を卓越周波数に限定することで効率的に騒音を軽減しようとするものである。騒音源が時間的に急激に変動する場合でも安定に効果が得られるアクティブノイズコントロール（以下、ANC）の制御方法、および、ANC による騒音が低下する領域の効果を評価することで機器配置を決定する指標の確立を目的としている。この制御方法および指標を使用して決定した機器配置により、実際の機械から発生する卓越騒音の対策において、有効な成果を得ている。

【第 1 章】では、研究の背景および目的が示された。低音域の卓越騒音の対策が求められる研究背景や、一般的な騒音対策方法、パッシブな低音域の騒音対策方法、および、ANC で用いられる従来の制御方法を概説するとともに、急激に変動する実際の機械音（低音域の卓越騒音）に対しては、従来の制御方法では安定して効果が得られないこと、また、ANC で領域の騒音を低減する場合、筐体等により実際には必ずしも最適な機器配置にできないこと、等から、研究の必要性が示されている。

【第 2 章】では、対象を卓越騒音に限定した制御方法が提案された。提案の制御方法では、バンドパスフィルタ（以下、BPF）により制御の対象を不快感に大きく影響する低音域の卓越騒音に限定し、周波数を時間領域で同定した後、周波数に応じた振幅比および位相差の補正値を用いて BPF を通過した信号を補正することで、卓越騒音と同振幅・逆位相の制御音を出力する。卓越騒音が複数ある場合、

BPF を並列に接続する並列型と直列に接続する直列型の制御方法が示されている。

効果が現れるまでの速さに関するシミュレーションでは、単一の周波数が急激に変化する信号を音源とし、提案型の制御方法によって効果が得られるまでにかかる時間は、従来の制御方法と同程度であることが示された。続いて、効果の安定性に関するシミュレーションでは、複数の正弦波の複合音を音源とし、外乱として 1,000 Hz またはランダムノイズが重畳されたときのフィードバック型および提案型の制御による効果の安定性が確認されている。提案の制御方法では、少なくともシミュレーション条件においては従来の制御方法よりも安定であることが示されている。

提案型の制御による効果の確認実験において、まず正弦波および収録した建設機械のエンジン音を音源とした場合の効果が確認されている。音源が正弦波の場合では最大で約 20 dB、音源が収録した騒音の場合でも最大で約 15 dB の効果か実験的にも確認されている。更に、実験により提案型の制御に用いられるステップサイズパラメータ：μ による効果の違いが確認された。音源が収録したラフテレーンクレーン、およびバックホウのエンジン音の場合、μ = 0.0001～0.001 とすることで急激な変動に追従でき、卓越騒音を最大で約 10～12 dB 低減可能なことが示されている。

以上により、提案された制御方法により急激に変動する卓越騒音を軽減可能であると結論付けられている。

【第 3 章】では、機器配置を決定するための指標が提案されている。卓越騒音を制御の対象としていることから、機器配置を決定するための指標では、制御用スピーカ、制御に用いるマイクロホン、制御を行う領域である特定領域等の位置関係および床面からの高さと、制御の対象である卓越騒音の波長、制御用スピーカの指向角等から騒音を低減する特定領域内に等間隔で設けた評価点における効果を予測して特定領域の平均的な効果（平均効果）を求め、この平均効果を効果の目標値で基準化して算出している。

効果の予測式の妥当性を確認するため、数値解析（FDTD 法）で求めた評価点における音圧を使用して計算した効果と、提案された予測式で求められた効果を比較した結果は、概ね一致し、予測方法により解析的に効果を予測できることが示されている。同様に、実験により評価点における音圧を計測して算出した効果と、提案した予測式で求めた効果の比較では、5 dB 以上の効果が得られる範囲および増幅する範囲が概ね一致する等、予測方法の妥当性が示されている。

効果指標の妥当性を確認するため、同一の機器配置において、実験により評価点における音圧と目標値より求めた効果指標と、提案された予測式と目標値により求めた効果指標が比較された結果、両者は概ね一致し、実験値と予測値の効果指標の差は最大で 0.3 程度（予測効果で 3 dB）であることが確認されている。

以上により、機器配置を決定するための指標は実験結果を模擬できており、床面反射の考え方および評価指標が妥当であることが示されている。評価指標は簡易な方法での計算可能であり、実際の卓越騒音の低減において実用的であり、かつ、有用であるとの結論が得られている。

【第 4 章】では、第 2 章及び第 3 章で提案された方法を、実際の機械から発生する卓越騒音に適用した事例について示されている。建設機械（ラフテレーンクレーン、バックホウ、アジテータ車、発電機）のエンジン音に提案の制御方法（順に、単一周波数を対象とした提案型、単一周波数を対象とした提案型、並列型、直列型）が適用された結果、卓越騒音である周波数（約 60～約 160 Hz）の音圧を 5～12 (dB)低減できることが示されている。また、工場機械である削孔機のモーター音を音源として事前に求めた評価指標から機器配置を決定し、直列型の制御方法が適用された結果は、対象とした

100、150、300 (Hz)の音圧を、特定領域の平均で5.5、4.7、3.5 (dB)得られることが示された。

以上により、本研究で提案した制御方法および機器配置を決定するための評価指標により、実際の低音域に存在する卓越騒音を低減可能であり、有効な方法であるとの結論が得られている。

【第5章】では、本研究の総括が示されている。

審　査　の　要　旨

【批評】

本論文は低音域の卓越騒音が不快感に影響することに着目し、対象を卓越騒音に限定した制御方法と機器配置を決定するための評価指標を確立して、機械から発生する低音域の卓越騒音をアクティブノイズコントロール（以下、ANC）により低減する方法を示したものである。

急激に卓越騒音が変動する機械音を ANC に適用する場合、および ANC において最適な位置に機器を配置できない場合の問題点を提起し、対象を卓越騒音に限定することで、安定に効果が得られる制御方法と効果の予測を用いる機器配置を決定するための指標を提案している。従来の方法では制御音を同定する制御が常識とされ、また最適な機器配置でなければ ANC の適用が難しいことが常識とされいた。しかしながら、本論文では、バンドパスフィルタと時間軸上での周波数の同定により制御音を生成する制御方法、および、幾何的な条件から効果を予測することで機器配置を決定可能な指標を提案したものであり独創的であり、かつ、安定して効果が得られ安価で実現できるため実用的である。

本論文では、まず提案する制御方法の効果の発現速度と安定性に関するシミュレーションと実験を行い、急激に変動する卓越騒音に対しても、実用上有効な効果が得られることを示している。また、機器配置を決定するための効果予測について、数値解析結果との比較により解析値と同程度に評価できること、および効果指標について、騒音源の高さに関わらず実験値と同等の値が得られることを示している。これをもとに実際の機械から発生する卓越騒音へ、制御方法および効果指標を用いた機器配置を適用し、実用的な速度で対象音を低減できることを示したこと、および制約がある中でも効果予測により機器配置を決定し領域において一定の効果が得られる可能性を示したことは評価に値する。

本論文は、これまでは適用が難しいとされる急激な変動、不安定な音場、制約のある機器配置等の諸条件をもつ騒音に対して ANC を適用するため、ヒトの不快感が卓越騒音に大きく影響を受けることを考慮して、これに限定した制御方法および機器配置の決定方法を採用している。これによって騒音の急激な変動に追従でき安定して効果が得られ、さらに簡易な方法で機器の配置を決定できるよう提案法の一般化を行っている。このことから、提案された機器配置の決定方法によって当該制御方法にとどまらず、従来の制御方法を用いる場合でも機器配置を決定でき、ANC の適用可能性が広がる可能性を示している。本論文で提案された安定に効果が得られる制御方法はこれまで適用が困難であった騒音にも ANC の適用を可能とする方法であり環境性能を向上できる可能性があること、更に、効果予測による機器配置の決定方法は ANC による効果を簡易に評価可能とするものであり、今後も騒音制御分野はじめ様々な建築環境学分野への展望が期待できることから高く評価できる。

【最終試験の結果】

令和２年１月２８日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。