

[研究助成 (A)]

機械学習を活用した個々人に快適な振動騒音環境を提供する 能動型制御技術の構築

On the active noise and vibration control using biological signals

2191021



研究代表者

富山県立大学大学院
機械システム工学科

准教授

寺島 修

[研究の目的]

本研究の目的は個々人に快適な振動騒音環境を提供するための技術の構築です。

ロボットや人工知能の普及により機械と人が共生しなければならず、そのためには機械が人に迷惑をかけないことが必要です。しかし、残念ながら機械は動作する際に必ず振動と騒音を発生します。

技術が大きく進歩した昨今でもこの振動と騒音をゼロにすることは不可能です。また、近年では機械の軽量化・高速化・多モード化のため、従来に比べ振動と騒音の発生量が増加または振動と騒音が人にとってより耳障りとなっています。

このような背景から、機械が発生する振動騒音をその身近にいる人にとってより最適なものとする制御技術を構築し、人間と機械の調和を目指します。

本報告では、その一例として、自動車のシート振動に曝された被験者の振動の様子とストレス影響について調べた結果などについて報告します。

[研究の方法]

振動と人の関係について詳細に調べるため、自動車のシートと着座者の振動、そしてその振動により着座者が受けるストレスの関係につい

て複合的に調べました。本報では、その一環として行ったシートと着座者の振動加速度の計測とそれを用いたモード解析の結果、および、振動の有無による着座者が受けるストレスの差異について調べた結果を報告します。

実験車両には2008年式の直列4気筒、2,000ccエンジンを搭載した車両を使用しました。この車両のエンジンは3か所で車体に接続されエンジンが支持されており、エンジンで発生した振動がこの支持部から車体に伝達し、シート振動が発生します。本研究ではこの車両の助手席のシート振動に着目して研究を行いました。

図1に示すように助手席のシートをシートレールの最後方位置に固定し、シートのリクライニングも固定してこれを標準状態として計測を行いました。エンジン回転数を極力固定して計測を行うため、アイドル時のシート振動を計測対象とし、アイドル時のエンジン回転数は約



図1 着座者の写真

720 rpm で、エンジン始動時や冷却液の温度上昇時に見られるエンジン回転数の一次的な上昇時に計測を行うことを防ぐため、非接触式のエンジン回転数計（小野測器社 HT-6200）の受感部（小野測器社 OM-1200）をエンジンのイグニッションコイル付近に設置してエンジン回転数情報をモニタリングしながら計測を行いました。

シート振動の計測は3軸振動加速度センサ（PCB社 356A43、重さ4.2g）を使用して行いました。シートと車体の4か所の接続位置のうち、左前方の接続位置（締結ボルト）の振動加速度を基準信号、すなわち振動の入力位置とし、シート座面11カ所、シート背面11カ所で振動加速度と基準信号の2点同時計測を行いました。センサの出力信号の取得にはデータロガー（Keyence社 NR-500, CA04）を使用しました。計測時のサンプリング周波数は100 kHz、計測時間は10 sとしました。

着座者の振動加速度の計測はシート振動と同様に3軸振動加速度センサを使用して行いました。着座者は成人男性（身長163 cm、体重55 kg）とし、両足各2カ所および腹部2カ所、胸部2カ所、首1カ所、額1カ所の10カ所で振動加速度と基準信号の同時計測を行いました。計測時のサンプリング周波数は100 kHzとし、サンプリング時間は10 sとしました。なお、以降に示す生体信号の計測も含め、これらの実験は人を対象とする実験となるため、富山県立大学「人を対象とする研究」倫理審査委員会にて審査・実施承認を得るとともに、被験者と実験内容に関して同意した上で実験を行いました。

シート、および、着座者の振動のモード解析は実稼働・モード解析ソフトウェア（Vibrant Technology社 ME' scope VES）を使用して行いました。基準信号と各計測位置の計測結果から振動加速度の周波数応答関数を求め、その利得および位相の情報から各周波数の振動の様子を三次元表示しました。周波数応答関数は10 s分の計測データから算出しました。また、窓関

数はハニング窓としました。

着座者のストレスの計測と解析は生体信号の取得により行いました。生体信号は着座者の脳波とし、生体信号計測装置（ミユキ技研社 Polymate Mini）と付属ソフトウェアにより計測しました。計測時のサンプリング周波数は1 kHzとしました。脳波の計測では着座者の瞬きの影響を排除するため、電極をOz(8)の位置と耳朶に貼り、耳朶の信号を参照信号として閉眼状態で脳波の計測を行いました。脳波の計測はエンジン停止時（非アイドル時）とエンジン始動時（アイドル時）でそれぞれ5分間ずつ行い、脳波の差異からストレスの計測を行いました。計測に際しては、基準位置の振動加速度の計測も同時に行い、脳波の計測結果への振動加速度の影響の有無を確認しながら計測しました。脳波の解析は計測結果からパワースペクトル密度（PSD）を求め、8-12 Hzの周波数帯域（ α 波）のPSDの変化を調べました。PSDを求める際の窓関数は長方形、窓サイズは1,024点、オーバーラップは80%とし、5分間の計測で得られたデータを用いてPSDを求めました。

[研究の結果]

図2に基準信号と座面中央の振動加速度の周波数応答関数を示します。図2の横軸は周波数、縦軸は振動加速度を表している。図2に示すように、シート座面には概ね12, 18, 24, 48 Hzの振動加速度が特に強く発生していることが分かります。このうち、24 Hzの振動加速度は4気

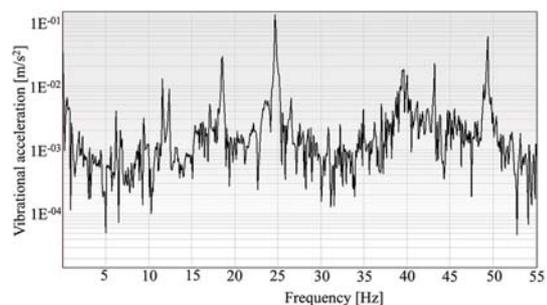


図2 基準信号と座面中央の振動加速度の周波数応答関数

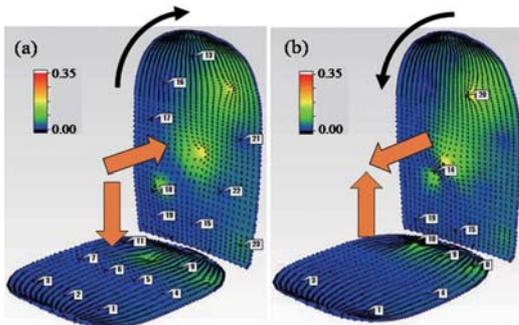


図3 シートに発生する振動の様子 (24.6 Hz)

筒エンジンに起因する振動のうち最も振動加速度が大きくなるエンジン回転数の2次成分の周波数に対応するものです。本報ではこの周波数の振動に着目して考察します。

図3に応答が最も大きくなる24.6 Hzの振動を三次元表示したものを示します。図の色は振動加速度の大きさを表しており、赤、青、緑の順に小さくなります。また、(b)は(a)に対して位相が180度ずれた時刻の振動の様子を表しています。図に示すように、24.6 Hzの振動加速度はシートの座面と背もたれが重なり合う方向に振動していることが明らかとなりました。

着座者に生じる振動加速度について、同様に24 Hzの振動加速度に着目して考察します。

図4に着座者に発生する23.7 Hzの振動を三次元表示したものを示します。図3と同様に図の色は振動加速度の大きさを表し、(b)は(a)に対して位相が180度ずれた時刻の振動の様子を表しています。着座者の両足の太もも付近では、左足が上方向に変位する際は右足が下方向に変位し、左足が下方向に変位する際は右足が上方向に変位しました。これより、左足と

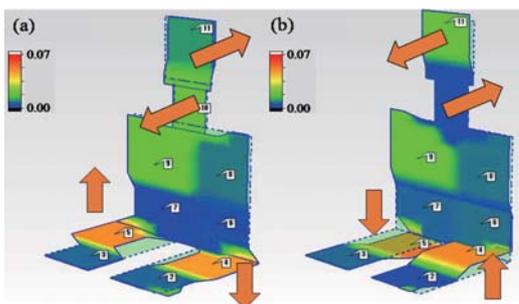


図4 着座者に発生する振動の様子 (23.7 Hz)

右足で位相が異なる上下方向の振動が発生していることが明らかとなりました。また、この周波数の振動は首、頭部、胸部でも発生しており、頭部が前方に変位する際は首と胴体が後方に変位し、頭部が後方に変位する際は逆に首と胴体が後方に変位しました。これより、頭部はシートの前後方向に首・胴体に対して逆位相で振動しているといえます。

図5に着座者に発生する24.1 Hzの振動を三次元表示したものを示します。図3と同様に図の色は振動加速度の大きさを表し、(b)は(a)に対して位相が180度ずれた時刻の振動の様子を表しています。この周波数の振動加速度は着座者の膝付近に強く発生しており、左膝が上方向に変位する際は右膝も上方向、左膝が下方向に変位する際は右膝も下方向に変位し、両膝は上下方向に同位相で振動していることが明らかとなりました。太ももで生じている振動はシート座面から伝達し、膝付近で生じている振動は足底を介してフロア面から伝達したため、太もも付近と膝付近で振動特性が異なったものと考えられます。これは、図3に示したシート座面の振動がシート座面の左側と右側で大きさや位相が異なっている点からも推察できます。

図6に計測した脳波の時系列信号を示します。横軸は時間、縦軸は計測器の出力電圧を表しています。図6より、非アイドル時とアイドル時の信号の比較から、非アイドル時はアイドル時に比べて振幅がやや大きくなっており、信号の標準偏差値は非アイドル時が8.6 mV、アイドル時が8.2 mVとなりました。また、眼球の運動・移動などによる信号ノイズはみられません

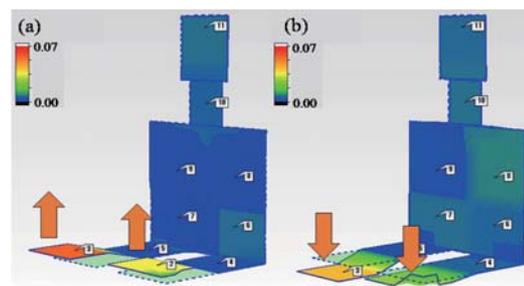


図5 着座者に発生する振動の様子 (24.1 Hz)

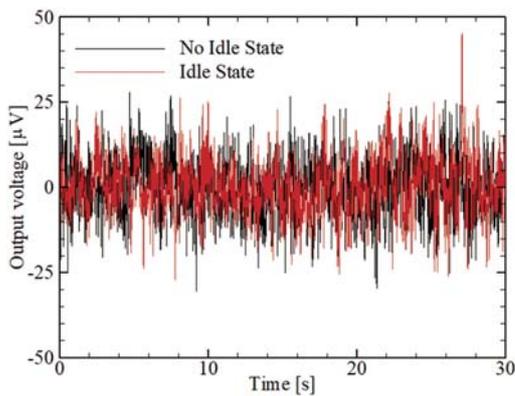


図6 計測した脳波の時系列信号

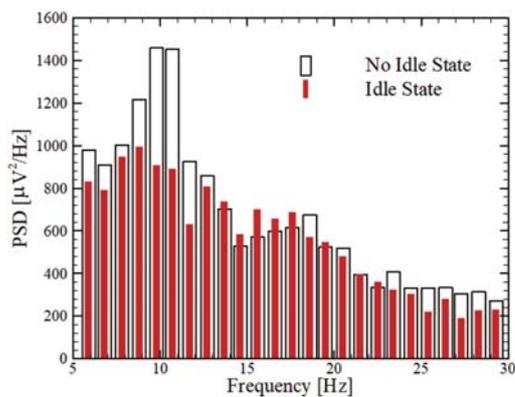


図7 脳波の時系列信号から求めた PSD

でした。

図7に図6に示した脳波の時系列信号から求めた PSD を示します。横軸は周波数、縦軸は PSD を表しています。図7より、非アイドル時とアイドル時では α 波の周波数帯域に大きな差異がみられ、アイドル時には α 波の大きさが低下し、非アイドル時の 0.75 倍程度となりました。これより、アイドル時にはリラックス感・安静感が少ない、ストレスが高まった状態にあるといえます。また、主にこの差異により図6にみられた標準偏差値の差異が生じたものと考えられます。なお、 β 波 (13-30 Hz) については、非アイドル時とアイドル時でその比率が 1.03 程度となり、大きな変化はみられませんでした。

ここまでで得られた生体信号と騒音・振動の状況に関する多くの測定データを基に、次いで機械学習を行い、不快をもたらす騒音・振動信号の特徴の特定を行いました。その結果、不快

に感じる振動のスペクトル形状を特定できることがわかりました。一方で、快に感じる振動の特定はこの手法では行えておりません。このため、現状では個々人に快適な振動騒音環境を提供するため、その人にとって不快な現象の除去にこの手法を用いることができると考えられます。

今後はさらに研究を進め、より直接的に人が好む振動騒音環境を制御するための技術の構築を目指します。上記の「不快の除去」は直接的に人に快適な振動騒音環境をもたらすものではないためです。この目的のためには生体信号の種類・解析方法の高度化が必須となりますため、引き続きご支援を賜れば幸いです。

[今後の研究の方向, 課題]

今後はこの多くの被験者、事象を対象に同様の計測と解析を行い、併せて生体計測・信号処理技術を高度化することで、研究の目的である個々人に快適な振動騒音環境を提供する能動型制御技術の構築を目指します。

[成果の発表, 論文等]

On the active vibration control of the vibrating objective by means of a PVDF actuator, Advanced experimental mechanics, Vol. 5 (2020), in Press.

Development of the Broad Band Frequency-tunable Dynamic Absorber Using Magneto-Rheological Elastomer for the Noise and Vibration Reduction in Mechanical Systems, Advanced experimental mechanics, Vol. 5 (2020), in Press.

移動車両のシート振動が乗員に及ぼすストレス影響, 日本機械学会 北陸信越支部 第 57 期総会・講演会講演論文集 (2020).

磁気応答性材料を用いた機械の転動音の能動的制御手法の検討, 日本機械学会 北陸信越支部 第 57 期総会・講演会 講演論文集 (2020).

[謝 辞]

本研究の遂行に際し、本学学生の澤田真宏氏、森崎稜磨氏に協力を仰ぎました。ここに記して謝意を表します。