複合振動に対する乗り心地の時間変化推定

○中川 千鶴 ((公財) 鉄道総研 人間工学)

Estimation of the time variation of ride comfort reflecting the influence of compound vibration

Chizuru NAKAGAWA (Railway Technical Research Institute, Ergonomics Lab.)

1. はじめに

鉄道分野では、振動乗り心地を評価する場合は、振動を方向別に扱うことが多い。これは、方向別に分析した方が測定しやすく、原因分析や品質管理に用いやすいからである。

しかし、旅客は様々な振動に時々刻々と暴露されるのであり、それは方向別に認識されるのではなく、「ひとまとまり」の振動（以後、複合振動と表記）として知覚される。つまり、旅客の感じる振動乗り心地は、複合振動の印象で決まる。例えば上下振動と左右振動が同時に生じると、旅客は方向別分析の数値よりずっと大きな振動に実際は曝されるが、これは複合振動として捉えなければ把握できない。

乗り心地評価法としては、①精度の高い評価推定、②品質管理・向上のための指針、という2つの要素を満たす必要がある。

そこで本研究では、複合振動が乗り心地評価へ及ぼす影響の時間変化の推定（以後、総合推定値と表記）を行ったので、ここに報告する。

2. 総合推定値の算出方法

鉄道分野の代表的な乗り心地評価法として「乗り心地レベル」がある。これは、成分方向別の加速度に、人間の感度を反映した重み付けフィルタ（乗り心地フィルタ）をかけて、評価区間の実効値を求めてレベル値として算出するものである。

我々は先行研究¹⁾で、乗り心地フィルタをより体感と合うよう改良したので、本稿ではこの改良フィルタを用いることとする。なお、このフィルタは前後・左右方向用 (W_{LTN_XY}) と上下方向用 (W_{LTN_Z}) がある。分析の流れを以下に示す。

- ① 前後、左右、上下振動加速度にそれぞれ時間軸上で重み付けフィルタをかける。

前後: $a_X(t) \rightarrow a_{Xf}(t)$, 左右: $a_Y(t) \rightarrow a_{Yf}(t)$,

上下: $a_Z(t) \rightarrow a_{Zf}(t)$

$a_X(t)$, $a_Y(t)$, $a_Z(t)$: 前後, 左右, 上下方向の加速度(m/s²)

- ② 重み付け後の前後・左右・上下振動加速度 $a_{Xf}(t)$, $a_{Yf}(t)$, $a_{Zf}(t)$ を3方向のベクトルとして、同時刻での合成ベクトル ($a_{XYZf}(t)$) の大きさを求め、評価区間の実効値 $a_{XYZf,rms}(T_n)$ を求める。

$$a_{XYZf}(t) = \sqrt{a_{Xf}(t)^2 + a_{Yf}(t)^2 + a_{Zf}(t)^2} \quad \text{式(1)}$$

$$a_{XYZf,rms}(T_n) = a_{XYZf}(t) \, dt \quad \text{式(2)}$$

- ③ 現行の方向別乗り心地レベルと比較するため、乗り心地レベル算出と同じ方法でレベル値にする（総合推定値）。

総合推定値:

$$L_{T_XYZ}(T_n) = 20 \log_{10}(a_{XYZf,rms}(T_n)/A_0) \, [\text{dB}] \quad \text{式(3)}$$

基準加速度: $A_0 = 10^{-5} [\text{m/s}^2]$

式(3)で求めた値を総合推定値とし、振動成分の方向によらない、各評価時点の総合振動の乗り心地影響を表す指標とした。なお、ここでは、日本の鉄道分野で従来から使われている方向別の乗り心地レベル値と対応つけるため、式(3)の方法でレベル化を行ったが、振動成分の方向によらない総合推定値としての基本的な考え方は式(1)～(2)に表わされる内容が該当する。

3. 総合推定値と主観評価との比較

総合推定値の妥当性を検証するため、実際の体感乗り心地との一致度を調べた。振動台（車内振動騒音評価シミュレータ）試験と新幹線走行試験を行い、床面加速度から算出した総合推定値と主観評価との対応を比較した。

3-1. 妥当性検証1: 振動台試験

車内振動騒音評価シミュレータを用いて、一般利用者71名で、在来線特急および新幹線走行振動

に対する乗り心地評価試験を実施した。用いた振動刺激は、新幹線と特急列車の2条件（各3分間）をつなぎ合わせたものである。被験者2名は振動台上の新幹線用二人掛け座席に腰掛け、提示される振動に対し、「新幹線の乗り心地」としての不快感を5段階尺度（1：問題ない～5：非常に不快）で5秒おきに押しボタンで回答した。

床面の加速度を用いて前述の方法で5秒おきの総合推定値を求め、主観評価平均値との相関係数を調べた結果、在来線特急では0.9、新幹線では0.8と高い相関を示した。

3-2. 妥当性検証2：実車走行試験

新幹線による実車走行試験を行い、総合推定値と主観評価の関係を調べた。被験者は鉄道関係者23名（全て男性）で、車内振動の乗り心地について5秒おきに5段階（前述の振動台試験と同じ）で回答した。評価は1回10分前後で、14回行ったが、ここでは主観評価が0.8ポイント以上変動した11試番について報告する。主観評価と各指標値（総合推定値と方向別乗り心地レベル）の時間変化例を図1に、主観評価と各指標値との相関係数を図2に示す。No. 4～6が立位姿勢、その他は座位姿勢である。

図1から、総合推定値と主観評価平均の変化がほぼ一致していること、主観評価の悪化ピークに対して左右と上下振動だけではピンポイントで推定できていないことがわかる。

図1 主観評価と総合推定や方向別の乗り心地レベルの比較（走行試験）

図2の主観評価との相関については、総合推定値の方が方向別の乗り心地レベル値より高かったのは7試番（64%）で、残り4試番中2試番（No. 4, 11）も大きな差はなかった。しかし方向別の方が主幹評価と相関が高かった2試番（No. 7, 9）があったため、特に差の大きいNo. 7について詳細に調べたところ、評価区間（6.3分間）のうち、最初の4分間では、総合推定値は図1の例のように主観評価と極めて類似した変化を示し、良好な推定が行われていた。しかし、後半に、主観評価に比して総合推定値が大きく上昇した2箇所があったために全体の相関係数が低下したことがわかった。この総合推定値の上昇は、1Hz以下の左右振動の際立った増加が原因だったが、実際の被験者は、背もたれにホールドされる座位姿勢であったため、1Hz以下の左右成分を推定値より小さく評価した可能性がある。

4. 考察

以上より、提案する総合推定値は、乗り心地の時間変化を推定できる可能性がある。しかし検証試験で示したように、推定値と体感が合致しない箇所もみられ、今後検討する必要がある。

今後は、総合推定値の高性能化を目指すとともに、推定値悪化箇所の原因分析を目的とした、方向別振動成分や軌道・構造物情報などを一元的に示すプログラムを開発中である。

参考文献

- 1) 中川 千鶴，他：“高周波振動を考慮した乗り心地評価法”，鉄道総研報告，Vol. 26，No. 1，pp. 33-38，2012。

図2 総合推定値および方向別乗り心地レベルと主観評価の相関