

リズム感および音質経時変化を考慮した精密情報機器の快音設計

Comfortable Sound Design for Precision Information Equipments in Consideration of the Rhythmical Sense and the Sound Deterioration with Age

精密工学専攻 20 号 白方 翔
Sho Shirakata

1. はじめに

近年、複数の機能を 1 つの機器に統合した多機能周辺機の普及が進んでいる。コピー、プリンタ、FAX、スキャナなどの機能を持つ MFP (Multi Function Peripheral) では、省スペースや作業の効率化といったメリットがある。しかしながら常に高速化および高精細化が望まれるため、さらなる部品の増加、機構の複雑化により、その動作音が問題となり、快適な動作音とする快音化が望まれている⁽¹⁾。

そこで本研究では、次に挙げる 4 つの事柄を実施し、MFP 動作音の快音化を行う。まず 1 つ目として、非定常音である MFP 動作音の音質評価を行い、音質に寄与が高い現象を導く⁽²⁻⁴⁾。2 つ目は繰り返される過渡音により形成されるリズム感に着目した音質評価を行うことで、好まれる動作音を推定する⁽⁵⁾。3 つ目は設計段階で快音設計が行えるよう音響シミュレーションを用いて非定常動作音の予測を行う⁽⁶⁾。最後に長期的使用による音質経時変化に着目し、音質安定化手法の開発及びリズム感安定化の指標提示を行う⁽⁷⁾。

2. 非定常動作音の音質評価

2.1 MFP 動作音の概要

MFP 動作音の測定条件を Fig. 1 に示す。マイクロフォンの位置は MFP を使用する人間の平均的な耳の位置である地上から高さ 1.5m、MFP 本体から 0.25m に設定する。

この条件下で測定した A4 モノクロ連続 10 枚コピー音を Fig. 2 に示す。連続コピー音は非定常音であり、現象毎に区切ると起動部 (Start-up)、過渡部 1 (T1)、定常部 (Steady)、過渡部 2 (T2)、過渡部 3 (T3)、過渡部 4 (T4)、過渡部 5 (T5) の 7 つの部分に分けることができる。また、2 枚目コピー以降の動作音には印刷枚数に比例した過渡部 3~5 を含む周期部 (Cyclic) が存在し、1 周期部時間長さはおよそ 1.3 秒である。



Fig. 1 SP measurement of MFP

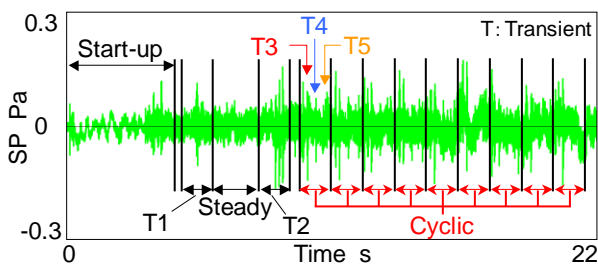


Fig. 2 SP data of 10 times continuous copies mode

2.2 SD 法を用いた非定常音の音質評価

連続 10 枚コピー音においてどの現象が音質に寄与が高いかを知ることができれば効率的な快音化を行う事ができる。そこで各現象に変化を与えた音源を個別に作成し、それぞれ原音と相対評価する。その結果、最も変化を感じた音源の現象が最も音質に寄与が高いといえる。

今回過渡部に関しては、その過渡部を定常音に見なせるよう周りの定常音と置き換えることにより変化を与える。一方、定常部に関しては特徴的な周波数にフィルターをかけることで変化を与える。評価は SD 法により行い、半無響室内で原音を基準としてそれぞれの音源を相対評価してもらう⁽⁸⁾。

SD 法により得られた回答を因子分析し、第 1 因子から順にそれぞれの因子を美的因子、衝突因子、動作因子、変化・リズム因子と名づける。美的因子と変化・リズム因子の因子散布図を Fig. 3 に示す。これより、過渡部 3 が連続 10 枚コピー音において最も音質及びリズムに寄与が高いことがわかる。しかしながら Fig. 4 に示す美的因子と動作因子の因子散布図を見ると、過渡部 3 を定常音に置き換えると動作感が無くなり、聞き心地が原音よりも悪くなるのがわかる。

そこで次章では連続コピー音の快音化手法としてリズム感変更による快音化を検討する。



Fig. 3 Beautiful factor vs. Changed & Rhythmical factor

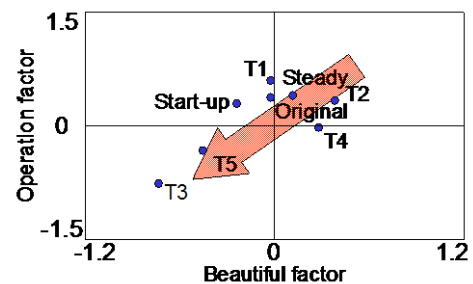


Fig. 4 Beautiful factor vs. Operation factor

3. 周期音のリズム感評価

本章では繰り返される周期部時間長さによって形成されるリズム感と、周期部内を構成する過渡部により形成されるリズム感について検討し、好まれる周期音を推定する。

3.1 周期部時間長さを変更したリズム感評価

評価音源には Fig. 5 に示す周期部時間長さ 1.3 秒である Original 音源と、その周期部の時間長さを 1.0 秒、1.1 秒

に短縮, 1.5 秒, 1.9 秒に拡張したものの計 5 つをそれぞれ 5 周期分の長さで作成したものを使用する. 評価は一対比較法で行い, その結果は Fig. 6 となる. この結果より周期部時間長さ 1.1 秒~1.3 秒の周期音が好まれることがわかり, 周期部時間長さについては現状のまま問題がないといえる.

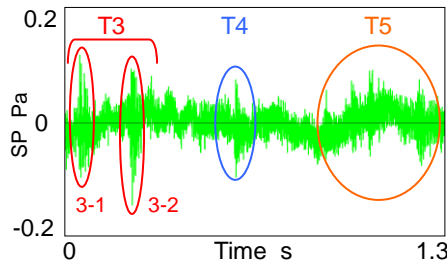


Fig. 5 SP data of Cyclic part

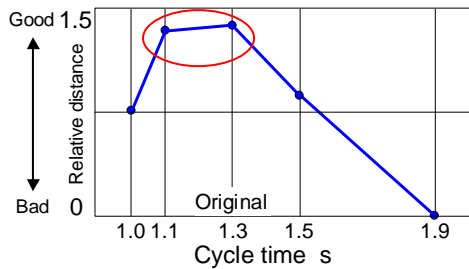


Fig. 6 Relative distance of Cyclic part length

3.2 過渡部発生位置を変更したリズム感評価

周期部時間長さ 1.3 秒の Original 音源において, 過渡部の発生位置を変更したリズム感評価を行う. 音源には Original 音源と, Fig. 7 に示すよう周期部内を 8 等分した位置に過渡部 3~5 を一致させたものを用いる. ここで過渡部 4' は p, q, r の 3 つの位置に移動させる.

評価は一対比較法により行い, その結果は Fig. 8 となる. この結果より, 周期部内を等間隔化した位置に過渡部を合わせ, 且つ過渡部 4' を位置 q に置いた周期音が好まれることがわかる. よって過渡部を等間隔に配置することで音質を向上できるといえる. しかしながら同じように過渡部を等間隔化した場合でも, 過渡部 4' が p, r の位置にある時は大きく評価が下がっている. このことから好まれる等間隔化リズムが存在すると思われる. また, このような結果になった原因として, 被験者が Original のリズムに聞き慣れてしまったことも考えられる.

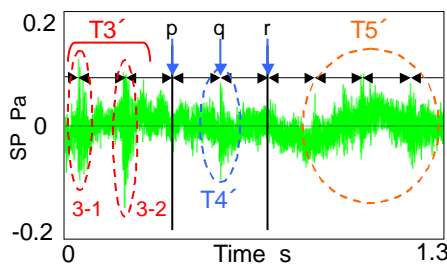


Fig. 7 Equally spaced transient parts

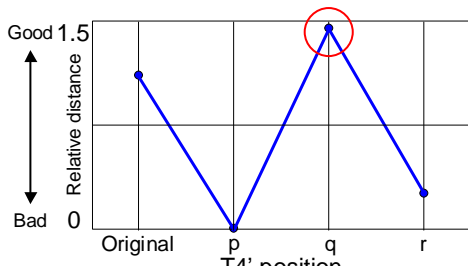


Fig. 8 Relative distance of T4' position

3.3 ランダム波を使用したリズム感評価

好まれる等間隔化リズムを調査するため, MFP の音ではなく音質一定のランダム波により作成した周期部でリズム感評価を行う. 本評価で使用する等間隔化周期部を Fig. 9 に示す. 評価音源には, 仮想過渡部 4 を 3.2 節と同様 A, B, C の 3 つの位置に移動した音源をそれぞれ 5 周期分作成する.

ここで被験者の「リズム慣れ」についても検討するため, 今までの評価に参加したことがある被験者だけでなく, MFP 動作音を聴いたことがない被験者にも評価を行ってもらう.

一対比較法により得られた結果を Fig. 10 に示す. この結果より, 3.2 節の評価結果と同様に, 仮想過渡部 4 が真中である B の位置にある周期音が好まれることがわかる. この傾向は従来の被験者も新たな被験者も同様であることから, このリズムが好まれる等間隔化リズムといえる.

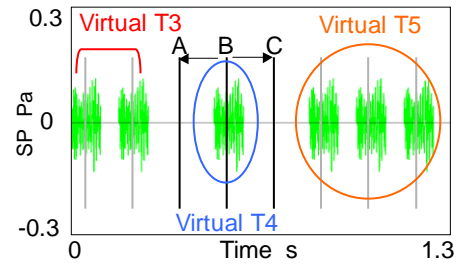


Fig. 9 Cyclic part of random sound

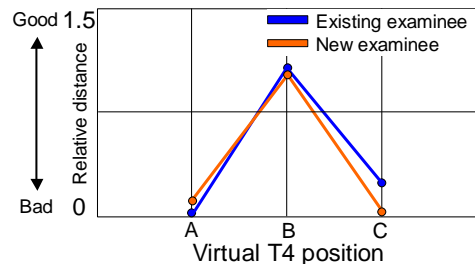


Fig. 10 Relative distance of Virtual T4 position

4. 音響シミュレーションを用いた快音設計

本章では音響シミュレーションを用いて MFP を模擬した簡易モデル内の音源を作成し, その有用性を評価する.

4.1 簡易モデルを用いた動作音測定

簡易モデル動作音測定実験のセットアップを Fig. 11 に示す. 音源にはポリゴンミラー及び, 連続 10 枚コピー音において音質評価に寄与が高い過渡音を模擬するため, ソレノイドを使用する. これらの音源を実機 MFP と同じ位置に設置し, マイクロフォンは上面にある開口部に設置する. このセットアップにおいてポリゴンミラーとソレノイドを同時に動作させた場合の動作音を測定する. その結果は Fig. 12 のようになる. これより 606 Hz にポリゴンミラーの回転周波数が高い音圧で発生し, 矢印で示す広い周波数帯の音圧がソレノイドを動作させたタイミングで現れているのがわかる.

このようにポリゴンミラーとソレノイドが同時に動作している場合の音源を音響シミュレーションにより作成する.

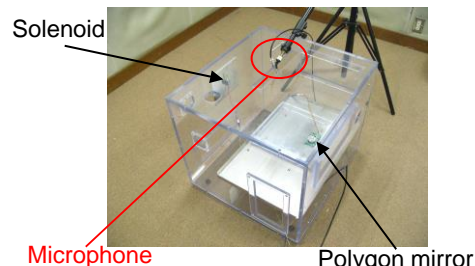


Fig. 11 Setup of simplified experimental model

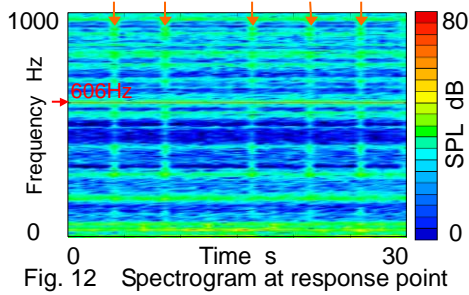


Fig. 12 Spectrogram at response point

4.2 音響シミュレーションの概要

本検討では音圧の入力と応答の比から計算される FRRF (Frequency Response Ratio Function) を求め、その FRRF をフィルターとして入力音源に掛けることでモデル内の特性が掛かった音源を作成する。解析への入力音源となるポリゴンミラー及びソレノイドの動作音はそれぞれ半無響室内で測定する。

解析モデルの概要を Fig. 13 に示す。実験と同様の位置に観測点を設け、音源の近くに参照点を設ける。ここで設定した音源は点音源であり、解析周波数帯で一定な音圧を出力する。音源毎に周波数解析を行い、得られたデータよりそれぞれの FRRF を算出する。

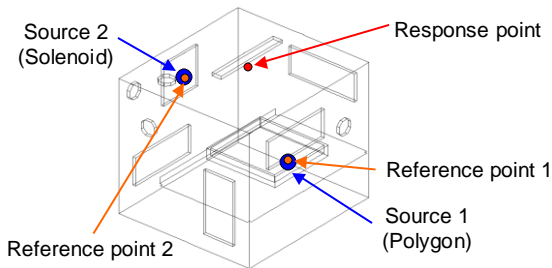


Fig. 13 Simulation model for FRRF analysis

4.3 作成音源の音質評価

音響シミュレーションにより作成した解析音の有用性を音質評価により確かめる。評価音源には実験音 (Exp), 解析音 (Ana), 入力音源 (Dry), 一般のランダム波を用いて実験音を模擬した音 (Ran) による基本の 4 つと、これらのリズム感を変更すると同時に、ポリゴンミラーの回転周波数である 606 Hz を 8 dB 下げて編集した音の 4 つを使用する。

評価に使用するリズムを Fig. 14 に示す。各音源は 1 周期部 1.5 秒の 5 周期分からなり、その長さは 7.5 秒である。基本とした 4 つの音には Fig. 14(a) のように 1 周期部を 16 分割したタイミングと一致しない位置に周期部中央のソレノイド音を設定し、リズム A とする。一方、編集した 4 つの音には Fig. 14(b) のように 1 周期部を 4 分割した位置にソレノイド音を設定し、リズム B とする。

評価は SD 法により行い、実験音でリズム A を基準としてそれぞれの音源を相対評価してもらう。

SD 法により得られた回答を因子分析し、第 1 因子から順にそれぞれの因子を美的因子、金属因子、類似因子、迫力因子、響き因子と名づける。美的因子と類似因子の因子散布図及び、音源のリズム感や音圧を編集した場合でも実験音に近い傾向があるかを確認するため、実験音と他の 3 音源における相関性を因子得点により計算した相関係数の値を Fig. 15 に示す。類似因子について見ると、リズム A では解析音が実験音に最も近いことがわかる。また相関性について見ると、ここでも解析音が実験音と最も近いことがわかる。これらのことから音響シミュレーションにより作成した音源を使用して設計段階で快音設計ができるといえる。

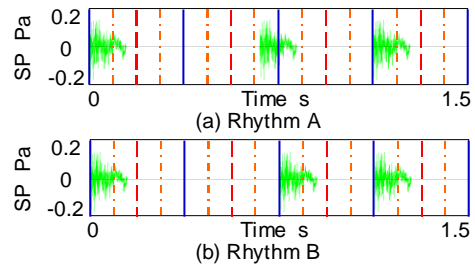


Fig. 14 Rhythm pattern for the SD test

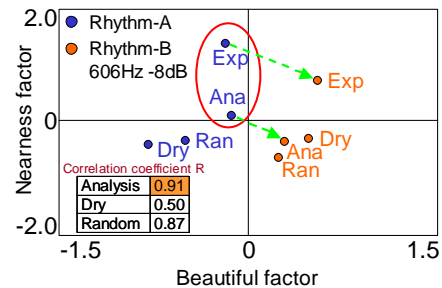


Fig. 15 Beautiful factor vs. Nearness factor

5. 音質経時変化を考慮した音質安定化手法の開発

5.1 印刷枚数における音質の変化

印刷枚数 2 万枚の動作音を基準として、通常とは異なる連続印刷により音質の経時変化を確認する。印刷枚数 2 万 (20k) 枚における定常部のスペクトログラムを Fig. 16 に示す。

定期的な動作音を測定した結果、印刷枚数が 11 万枚 (110k) に達した辺りで、動作音に変化が生じ始め、印刷枚数 20 万枚 (200k) では Fig. 17 に示すスペクトログラムとなる。これより、動作音に過渡的な音に加わっていることがわかる。

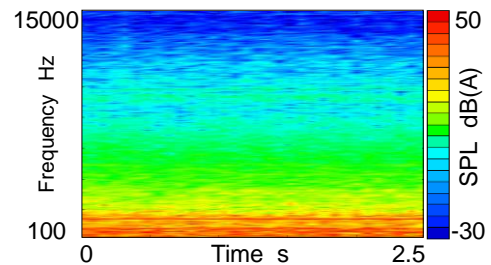


Fig. 16 Spectrogram of 20k Steady part

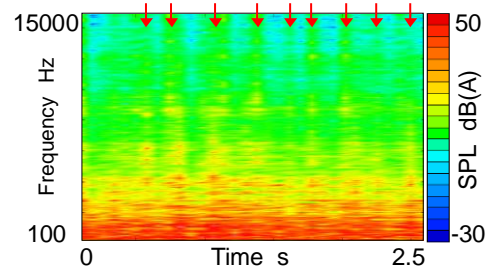


Fig. 17 Spectrogram of 200k Steady part

5.2 経時変化音源の同定

経時変化音源の位置を MFP 各面の音圧分布を測定することで同定する。今回音圧分布の結果として出力する周波数は過渡音が発生した時のみ音圧が高くなり、ノイズの介入が少ない 852 Hz とする。マイクホン 8 本を使用して、各面計 72 点の音圧を測定する。

音圧分布測定実験により得られた 852 Hz における音圧分布の一部を Fig. 18 に示す。この結果から、紙が排紙される排紙口に音源があると推定できる。

そこで排紙口を調査すると、排紙ローラに異物が付着していることが確認でき、それは成分分析により紙粉及びトナーの塊であることがわかった。これによりローラの回転にむらが生じ、過渡音を発生していたと考えられる。

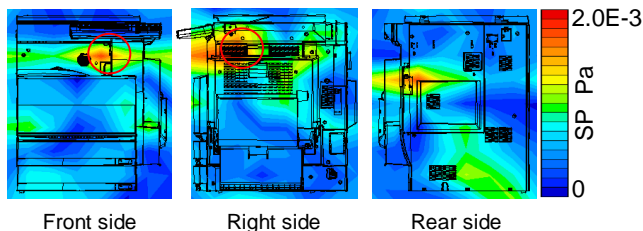


Fig. 18 Sound pressure distribution at 852 Hz

5.3 音質の経時変化評価

排紙ローラを交換することでどれほど音質が改善されるかを、一対比較法を用いた音質評価により確認する。評価音源には印刷枚数 2 万枚, 11 万枚, 20 万枚, 排紙ローラ変更後の 22 万枚 (220k) における動作音を使用する。

評価の結果を Fig. 19 に示す。印刷枚数 2 万枚から 20 万枚までは印刷枚数の増加と共に動作音が経時変化し、音質に悪影響を及ぼしていると言える。そしてローラ交換後の音は初期のコピー音と同程度の評価結果が得られており、ローラが経時変化音源であることが確認できる。

これより排紙ローラにトナーや紙粉が付着しないよう改善することにより、MFP 動作音を安定化することができ、長期的使用による音質の劣化を防ぐことができると言える。

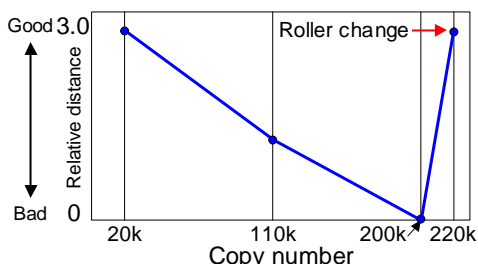


Fig. 19 Relative distance of copy number

5.4 印刷枚数における過渡音のばらつき

次に過渡部の時間ばらつきを調査する。Fig. 20 のように過渡部 3-1 同士の時間ばらつきと過渡部 3-1 と 3-2 間の時間ばらつきを調査し、標準偏差を計算する。ここで、過渡部 3-1 同士の時間ばらつきを周期間ばらつき Δt_{T31} と呼び、過渡部 3-1 と 3-2 間の時間ばらつきを周期内動作ばらつき $\Delta t_{T31-T32}$ と呼ぶ。印刷枚数 30 万枚まで定期的に過渡部の時間ばらつきを調査した結果、周期間ばらつき Δt_{T31} と周期内動作ばらつき $\Delta t_{T31-T32}$ では経時変化の傾向は見られず、共に標準偏差は 0.025 秒程度であった。

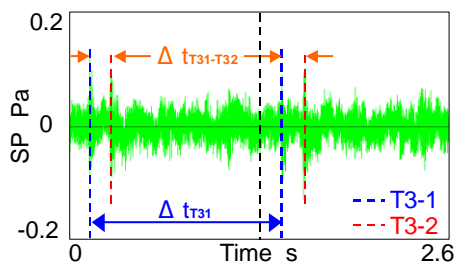


Fig. 20 T3 time dispersion

5.5 印刷枚数におけるリズム感の変化

過渡部の時間ばらつきが与える聴感上の影響を 2 種類の音質評価により調査し、指標を提示する。

まず始めに、周期間ばらつきに関して評価を行う。10 周期部における周期間標準偏差が 0 秒である音を基準音とし、その周期間標準偏差が 0.01 秒, 0.03 秒, 0.05 秒, 0.07 秒, 0.09 秒となるように 5 つの評価音源を作成する。この 5 つの音源を基準音と比較し、聞き心地について相対評価してもらう。

もう 1 つの評価は、周期内動作ばらつきに関して同様の標準偏差になるよう作成した 5 つの評価音源を用いて実施する。

2 つの音質評価結果を Fig. 21 に示す。不快を感じた人の割合 70% を着目する基準とすると、周期間標準偏差は 0.09 秒程度から、周期内動作標準偏差は 0.05 秒程度から不快を感じ始めることがわかる。これより、周期内動作ばらつきの方が音質及びリズム感に寄与が高いと言える。

現状の印刷枚数 30 万枚における過渡部 3 の時間ばらつきはどちらも 0.025 秒程度であるが、今後印刷枚数が増えるにつれてばらつきが増加する可能性がある。よって過渡部 3 の時間ばらつきを抑えるための対策が必要だとする。

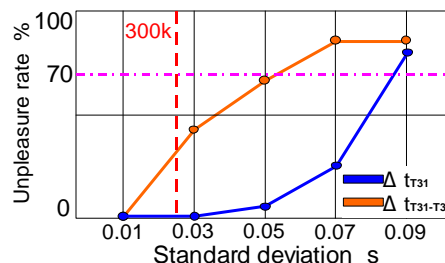


Fig. 21 Impression of time dispersion

6. 研究成果

- (1) SD 法を用いて非定常音である連続 10 枚コピー音を音質評価し、最も音質に寄与が高い現象を導いた。
- (2) 連続コピー時に発生する周期部により形成されるリズム感を評価し、好まれる周期音を推定した。
- (3) 音響シミュレーションにより作成した音源を使用して設計段階で快音設計ができることがわかった。
- (4) 経年変化音源を対策することで初期の動作音と同程度まで音質が改善されることを音質評価により確認した。
- (5) 周期間ばらつきと周期内動作ばらつきを定義し、それらの影響を把握し、許容範囲を提示した。

参考文献

- (1) 戸井武司, “トコトンやさしい音の本”, 日刊工業新聞社, (2004).
- (2) Masao YAMAGUCHI *et al.*, “Sound quality evaluation of transient sounds in precision information equipments”, J. Acoust. Soc. Am., 120(5), 3367, (2006).
- (3) Sho SHIRAKATA *et al.*, “Sound source identification for precision information equipments having many kinds of sound sources”, J. Acoust. Soc. Am., 120(5), 3367, (2006).
- (4) 山口雅夫 他, “複数音源を有する精密情報機器における周期音の音質評価”, 音講論, 399-400, (2007-3).
- (5) 白方翔 他, “複数音源を有する精密情報機器における周期音のリズム感評価”, 音講論, 397-398, (2007-3).
- (6) 白方翔 他, “複数音源を有する精密情報機器の音響シミュレーションを用いた快音設計”, 音講論, 1-7-5, (2008-3).
- (7) 山口雅夫 他, “複数音源を有する精密情報機器の音質安定化手法の開発”, 音講論, 1-7-6, (2008-3).
- (8) 難波精一郎, “音の評価のための心理学的測定法”, コロナ社, (1998).