

自動車用操作スイッチの動特性と操作感覚に関する研究

人間環境学専攻 2009年3月修了
076813 森岡 崇
指導教員 佐々木 健 教授

Designing switches is time consuming because the relationships between characteristics of a desired switch and design parameters such as spring stiffness or stroke are not very clear, and furthermore, physical evaluation requires prototypes. A haptic Virtual Prototyping Environment (VPE), in which CAE (Computer-Aided Engineering) and haptic interface work together to display virtual feelings of mechanisms designed by CAD (Computer-Aided Design) will enable designers to feel the motions of the designed switches without prototypes. This paper presents an evaluation of relationships between dynamic characteristics and switch feeling. Measurement of acceleration and sensory evaluation show that dynamic characteristics affects as much on the quality of reality as static characteristics. They also indicate the mutuality in characteristics of acceleration and sensory characteristics.

Key words : Haptic, Switch Feeling, Sensory Evaluation, Force Feedback

1 緒言

現代の乗用車には走行性能のみならず、多様な付加価値が求められる。その一つに車内機器の操作感があり、ブランドのための機器操作感の統一設計等が実際に行われている。こうした車内スイッチの設計は、設計者が持つ経験と、試作による挙動の確認によって行われることが大半である。しかし、この設計サイクルでは試作工程により設計期間が長期化する。そのため、CAD、CAE、力覚デバイスの3つを連携させ、短時間で設計情報からスイッチの操作感覚を再現する手法が提案されている¹⁾。

力覚デバイスとは仮想物体と人が接触した際の力感覚を提示する装置である。力覚デバイスを試作の代用として用いるためには、力覚デバイスが解析結果から得られる操作感覚を正確に再現する必要がある。こうした力覚デバイスを実現するためには人間の感性に基づく力覚デバイスの評価をし、そこから制御の改善を行っていく必要がある。過去の研究においては、多数の被験者による官能評価試験によって力覚デバイスの評価が行われている。この官能評価は力覚デバイスの評価法としては妥当性のある手法であるが、力覚デバイスの設計へのフィードバックという観点から考えたとき、この官能評価の結果からは、力覚デバイスの具体的な設計上、制御上の問題点を抽出することが困難だと考えられる。

この問題を解決するには、人間の感性と対応関係を持つ、定量的な評価手法を確立することが重要となる。これにより、力覚デバイスの評価と改善を定量的な評価手法に基づいて行うことが出来る。しかし、この定量的な評価を行うためには評価指標と人間の感性との対応関係を解明する、感性工学的な知見が必要となる。一方、感性工学的な知見を得るためには様々な操作感覚を提示できる力覚デバイスの利用が必要となる。すなわち、これらは卵と鶏の関係であり、高度な力覚デバイス構築のためには、定量的な評価指標に基づく制御の改善と、定量的指標による人間の感性の解明を両輪として進めていかなければならないといえる。本研究ではまずスイッチの持つ静的な特性を再現することが可能な力覚デバイスを製作したが、静特性の再現だけでは操作感覚を再現することは困難であることが分かった。そこで力覚デバイスの評価手法としてデバイスの動特性が評価可能な、指での操作時の加速度変化を評価指標として提案する。さらに、その結果に基づいて力覚デバイスの制御の改善を行い、官能評価によって感性工学的な裏づけを行う。

2 力覚デバイス

2.1 1自由度力覚デバイス

本研究ではスイッチ操作感再現の対象として、乗用車内のパワーウィンドウスイッチを取りあげ、一自由度回転運動が可能な操作部分を備えた力覚デバイスを製作した。アクチュエータとしてボイスコイルモータを用い、変位センサとしてレーザ変位計、力センサとして歪みゲージを使用している。スイッチ端部には表面触覚による影響を考慮し、実機スイッチの外装を取り付けている。力覚デバイスの力覚提示部の機構を Fig.1 に示す。

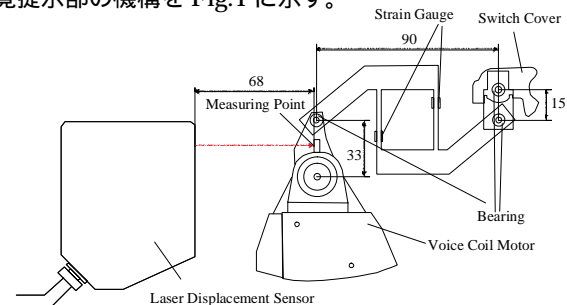


Fig.1 Haptic Interface

2.2 FS 特性に基づく静特性の制御

スイッチのカチツとした操作感はクリック感と呼ばれる。クリック感の特徴は Fig.2 に示される Force-Stroke (FS) 特性によって表され、Fig.2 中の反力の極小値を通過する部分で急激な加速と減速が起きることによってクリック感が感じられる。

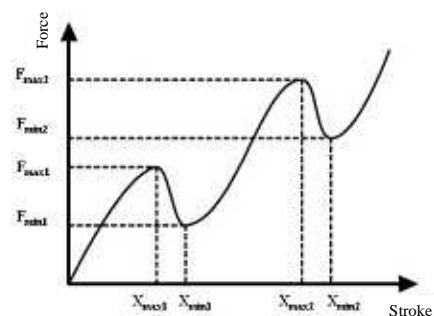


Fig. 2 Example of Force-Stroke Curve

こうしたスイッチの挙動は非線形要素を含む複雑な系によるものである。リアリティのある力覚提示のためには反力計算周期の高速性が重要であることが分かっており²⁾³⁾、スイッチの操作感提示のためには数 kHz から数十 kHz のサンプリング周波数が必要であると考えられる。

スイッチの機構挙動をこうした周期で計算することは困難である。本研究では、CAEによる機構解析をあらかじめ行い、その結果として得られるFS特性をデータとして参照して力覚デバイスを制御し、非線形要素を含むスイッチの操作感提示を行った。

2.3 静特性の制御の問題点

FS特性に基づく制御を行うことにより、力覚デバイスによって実機の静特性を再現することが可能となった。しかし、その操作感覚は次の点で実機と明らかに異なるものであった。

- クリック感が実機よりあいまいである
- 操作が実機と比べ滑らかに感じられる

この原因は力覚デバイスの力覚提示部の質量が平行運動換算で約220gと重く、これによって機構の動特性が実機と異なっていることであると考えられる。また、これは動特性が操作感に大きく影響を及ぼしていることを示す。

2.4 動特性の制御による操作感提示

FS特性に基づく制御によって実機の静特性を再現した結果、力覚デバイスは力覚提示部の質量によって動特性が変化し、実機と操作感覚が異なっていることが分かった。そこで本研究では、以下の2つの制御法により操作の動特性を実機に近づけることで、実機に近い操作感提示を行う。

2.4.1 カフィードバックによる等価質量の制御

力覚提示部の質量の影響を減らすための方法としてまず考えられるのは、操作部分の動作に対して加速を助ける方向にパワーアシストを行うことで、等価的に質量を制御する方法である。一般的にこうした正のフィードバックを行う制御は発散しやすいため、この制御ではフィードバックループの応答時間が重要となる。本研究では、操作部分にひずみゲージを取り付け、操作力から現在の加速度を計算し、パワーアシストを行う制御を用いた。制御のブロック線図をFig.3に示す。

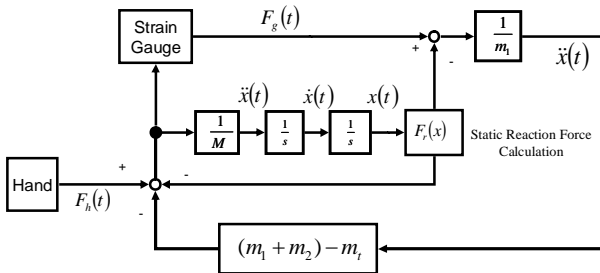


Fig.3 Block Diagram of Power Feedback Control

制御目標とする等価質量の値を m_t 、力覚提示部の歪みゲージ - ボイスコイルモータ間の等価質量を m_1 、歪みゲージ - スイッチ外装の等価質量を m_2 、歪みゲージからの入力を F_g 、静特性から求められる反力を $F_r(x)$ とおくと、パワーアシストに必要な力 F_{out} は次のように求められる。

$$F_{out} = -(m_1 + m_2 - m_t) \frac{F_g - F_r(x)}{m_t} \quad (1)$$

2.4.2 仮想粘性による動特性の制御

操作時の加速度という観点から考えたとき、スイッチの操作中で大きな加速度の変化がおきるのはクリック動作が起こる部分だけである。このことから、操作全体の加速

度を制御するのではなく、クリック動作時の加速度のみをアシストすることでも操作者には質量の影響を感じさせることのない操作感覚が得られるのではないかと考えられる。そこでクリック動作のうち、反力が低下して加速が起こる部分とスイッチが減速して停止する部分で、機構の速度に比例する成分、すなわち仮想的な粘性に当たる成分を制御することで、クリック動作の加速度をアシストする制御を行った。制御のブロック線図を Fig.4 に示す。

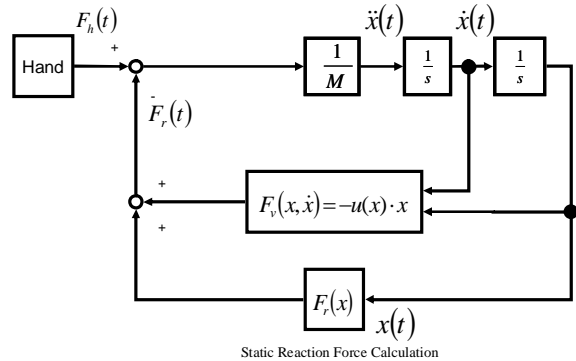


Fig.4 Block Diagram of Virtual Viscosity Control

3 操作加速度による各制御手法の評価

3.1 実験装置及び実験方法

動特性の評価手法として、本研究では操作加速度による評価を提案する。これは実際に指で操作した際のスイッチ端部の加速度変化に基づき、力覚デバイスの特性の評価を行うものである。この手法を用い、FSカーブによる制御、および前節で述べた2種類の制御手法の定量的評価を行った。測定にはMEMS加速度計を用いた。

3.2 実験結果

実験によって得られた実機及び力覚デバイスの各制御法における操作加速度のグラフを Fig.5 に示す。実機とFSカーブによる制御の操作加速度グラフより、実機と力覚デバイスの操作加速度の違いは次の2点であると考えられる。

- 実機のクリック動作に要する時間はおよそ5ms程度であるのに対し、FSカーブによる制御ではおよそ25msと約5倍の時間を要している。
- 加速度のピーク値は実機でおよそ $\pm 140 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ であり、一方、FSカーブによる制御ではピーク値は $\pm 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ と、10倍以上小さい。

加速度変化に要する時間が長く加速度のピークも小さい、という差異によって、FSカーブによる制御のクリック感をはじめとした操作感覚の差異が現れていると考えられる。

動特性の制御を行った2つの制御は、いずれもFSカーブによる制御に比べて比較的に実機に近い操作加速度を示している。質量制御によるグラフはFSカーブによる操作加速度に近い概形をしており、クリック動作にかかる時間は約15ms、加速度のピークは加速時で $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 、減速時で $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 程度である。粘性制御ではクリック動作に要する時間が約12ms、加速度のピークが加速時で $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 、減速時で $90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 程度とさらに改善されている。また、双方に見られるのが、およそ500Hz程度の高い周波数での加速度の振動である。図よりこの振動振幅はより強い制御をかけるほど大きくなっていることが

分かる。この振動は、歪みゲージを貼り付けるためのリンク機構が板ばねとなり、その固有振動数での過渡応答が起きているためと考えられる。

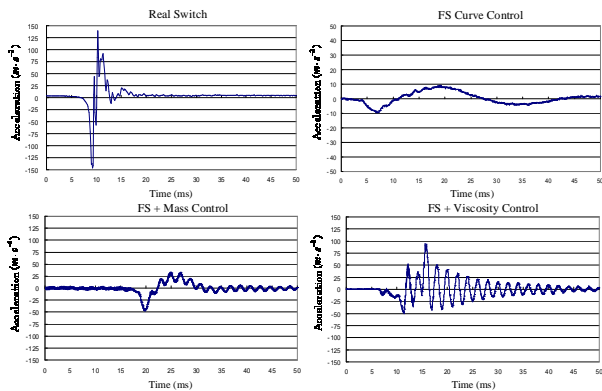


Fig.5 Acceleration of the Switch Body during Clicking Motion

4 官能評価

前述した二種類の制御手法を適用した力覚提示の官能評価を行い、再現対象となった実機との操作感の比較を行った。被験者は実機と力覚デバイス进行操作し、「操作全体の類似度」「荷重感の大きさ」「ストロークの長さ」「操作の滑らかさ」「節度感(クリック感)」の5項目について、実機を基準として評価を行う。各項目は1~5の5段階評価であり、類似度はスコアが高いほど類似度が高く、その他は実機を3とした際の相対評価である。

4.1 非熟練者による官能評価

まず第1に、学生7名を被験者として官能評価を行った。各スイッチ操作時の加速度変化をFig.6に、また官能評価の結果をFig.7に示す。

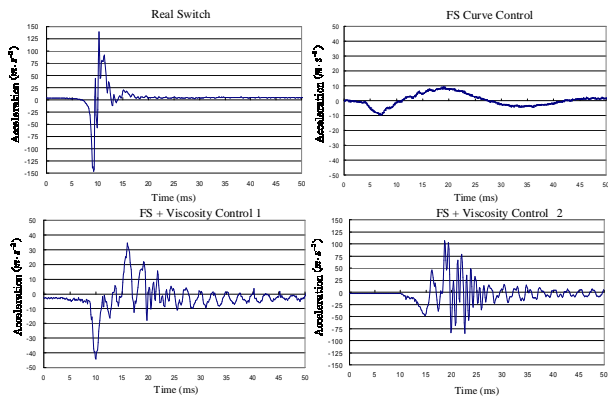


Fig.6 Acceleration of the Switch Body during Clicking Motion

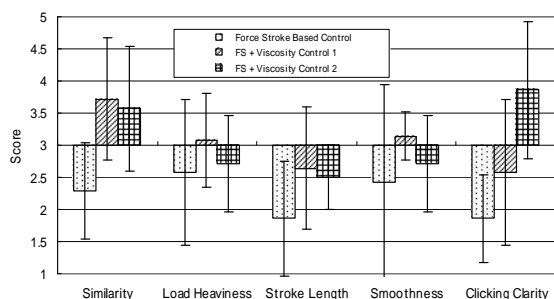


Fig.7 Result of Sensory Evaluation

官能評価の結果について、各項目ごとに議論を行う。

全体の類似度

Fig.7より、全体の類似度において動特性の2つの制御はFSカーブによる制御よりも1.5ポイント程度高いスコアを示した。このことから、動特性の制御によって操作感覚が実機に近づいたことを確認できる。また、加減速の加速度ピーク値を等しくした制御と、ピーク値の一方を大きくし、実機の加速度ピーク値の値により近づけた制御ではスコアにほぼ差がない。しかし、被験者7名中5名が最も操作感覚が実機に近かったスイッチとして加減速の加速度ピーク同士が等しい制御を挙げており、加速と減速のピーク値の相対的な差は、ピーク値の大きさよりも操作感覚に及ぼす影響が大きいと考えられる。

操作の荷重感

操作の荷重感については、加速度ピーク同士が等しい制御、ピーク値が大きい制御、FSカーブによる制御の順で荷重感が重くなることが分かった。FSカーブによる制御の荷重感が大きく感じられるのは、機構の質量により加減速が遅いことが原因だと考えられる。また、2つの動特性の制御での荷重感の差から、加速に対して減速の加速度が相対的に大きい場合、荷重感が軽くなると考えられる。

ストローク長

加速度の変化が遅いFSカーブによる制御を操作したとき、ストローク長はより長く感じられている。また、加速に対して減速のピークが大きいほど、感覚的にストローク長は長くなっていることが分かる。

操作の滑らかさ

加速度の変化が遅いFSカーブによる制御を操作したとき、より操作は滑らかに感じられている。また、加速に対して減速のピークが大きいほど、操作は滑らかに感じられている。

操作のクリック感

操作の節度感は加速度ピークが大きい順に節度感が強くなっている。その中で特徴的なのは、加速度のピーク値を大きくして実機に近づけた制御において、実機よりもクリックとした操作感が得られた点である。実機よりも加速度ピークの小さい制御においてより強いクリック感が得られたことから、加速時の加速度ピークに対して減速時のピークが大きいことによってクリック感が増すことが推測できる。

4.2 熟練者による官能評価

官能評価においては個々人の感覚の鋭敏さが評価の結果に大きく影響する。このことから、次にスイッチの操作感覚に熟達したスイッチメカの専門家9名による官能評価を行った。各スイッチ操作時の加速度変化をFig.8に、また官能評価の結果をFig.9に示す。

Fig.9より、全質問を通じ、熟練者の評価は非熟練者の評価に比べてばらつきがおよそ半分近く小さかった。熟練者は非熟練者に比べ、より個人間での操作感の評価が安定しているといえる。項目ごとのばらつきを比較すると、最も評価が安定していたのはストローク長の評価で、ばらつきの平均値は非熟練者が0.78であったのに対し0.13程度であった。ついで荷重感、滑らかさ、節度感の順で評価のばらつきが小さかった。

5 結論と今後の課題

本件球では、まず FS 特性に基づき、パワーウィンドウスイッチ実機の静特性を再現可能な力覚デバイスを構築した。その結果、操作感覚には力覚提示部の質量による動特性の変化が影響しており、静特性の再現だけでは実機の操作感覚を再現することができないことが分かった。

そこで力覚デバイスの定量的評価手法として、操作時の加速度変化を評価指標とする評価法を提案した。実機と力覚デバイスの操作加速度を比較し、力覚デバイスは質量により、動特性が実機と大きく異なっていることを確認した。

この結果に基づき、以下の制御により動特性を改善した。

- 力覚提示部にかかる力に対してパワーアシストを行うことで等価的な質量を制御する手法
 - スwitchのクリック動作が停止する位置で強い正の粘性、スイッチが加速する領域で負の粘性にあたる力を加えることで、操作加速度を変化させる制御
- これらの制御による機構の動特性の改善を、操作加速度の測定によって確認した。

さらに、力覚デバイスの各制御手法について、スイッチの操作感覚評価に熟練した被験者、熟練していない被験者による 2 度の官能評価実験を行った。いずれの実験においても、力覚デバイスの操作加速度がより実機の操作加速度に近づくことにより、操作感覚が実機に近づくことを確認した。また、加減速時の操作加速度のピーク値の差、およびクリック動作に要する時間が操作感に影響を与えているという示唆を得た。各被験者における操作加速度の変化の影響は Chart.1 に示す通りである。

Chart.1 Relationships between Characteristics of Acceleration and Sensory Characteristics

Not Skilled People	Load Heaviness	Stroke Length	Smoothness	Clicking Clarity
Less Time for Clicking Motion	Decrease	Decrease	Decrease	Increase
More Peak Acceleration in Stopping Motion	Decrease	Increase	Increase	Increase

Skilled People	Load Heaviness	Stroke Length	Smoothness	Clicking Clarity
Less Time for Clicking Motion	Little effect	Little effect	Decrease	Increase
More Peak Acceleration in Stopping Motion	Little effect	Little effect	Increase	Increase

本研究では操作加速度の評価に基づいて力覚デバイスの動特性を制御することにより、スイッチ実機に近い操作感覚を提示することができた。更なる制御の改善と感性工学的な発見がなされ、実機の試作の代用となりうる力覚デバイスが開発されることを期待したい。

参考文献

- 1) 山根尚人：「力覚による機構挙動の評価手法」2006 年度修士論文，東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻．
- 2) Lonnie Love, Wayne Book: "Contact stability Analysis of Virtual Walls", Proc. of Dynamic Systems and Control Division ASME 1995, pp-689-694.
- 3) Jun Murayama, Hiromi Shimizu, Chang Soo Nam, Hiroko Satoh, Makoto Sato: "A development of high definition haptic rendering for stability and fidelity", Proc. of 2007 International Conference on Cyberworlds, 2007, pp 346-352.

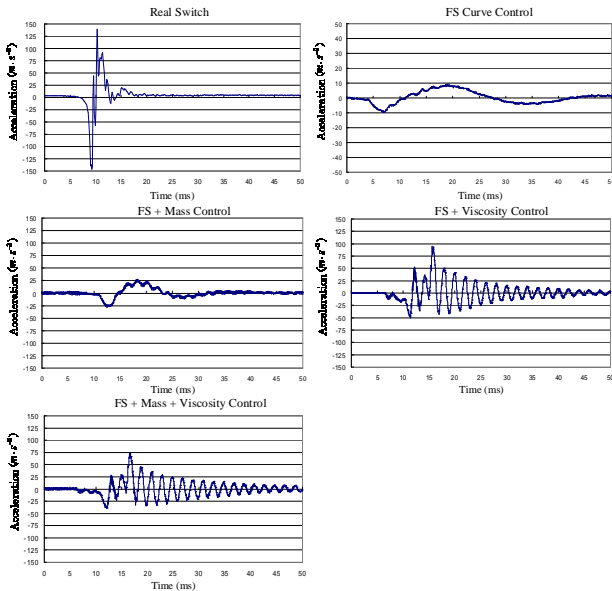


Fig.8 Acceleration of the Switch Body during Clicking Motion

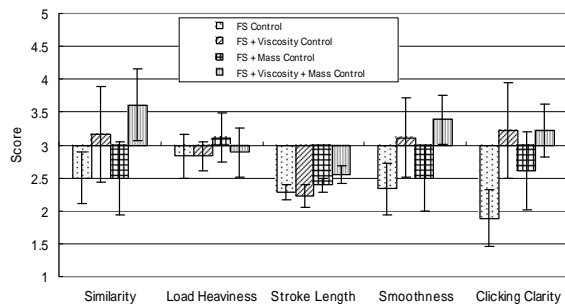


Fig.9 Result of Sensory Evaluation

全体の類似度

4 種類の制御法の中では、粘性係数の制御と質量制御を平行して行う制御が最も実機に近い操作感覚を提示できている。非熟練者と同様、実機に近い加速度のピークを持つものより、正負の加速度ピークの絶対値に近い制御のほうが実機に近い操作感を得られるという結果となった。

操作の荷重感、およびストローク長

これらについては、個々の大きな差は見られなかった。

操作の滑らかさ

第 1 の官能評価と同様、クリック動作が相対的に遅い FS カーブによる制御、質量制御の 2 つの操作はより滑らかであると評価された。また、粘性と質量の同時制御より、加速度ピークの差が相対的に大きい粘性制御のほうがより滑らかに感じられている。実機はこの 2 つの制御のどちらよりもクリックにかかる時間が短く、また加速度ピークの差が小さいが、この 2 つはいずれも実機より滑らかさが低い。原因として、2 つの操作の過渡振動が影響した可能性が考えられる。

操作のクリック感

操作のクリック感については、FS カーブによる制御、質量制御の順でクリック感が増し、粘性制御と粘性、質量の同時制御が同じスコアで最もクリック感が強かった。

- クリックの時間が短いものほどクリック感が強い
- 加速時の加速度ピークより減速時の加速度ピークが大きいほどクリック感が強くなる

という 2 つの傾向は第 1 の官能評価と一致する。