

# 衣服牽引装置による移動感覚の増強

## Enhancement of Motion Sensation by Pulling Clothes

○ 大石 恵利佳 (電通大) 高下 昌裕 (電通大)  
Khurelbaatar Sugarragchaa (電通大) 梶本 裕之 (電通大)

Erika OISHI, The University of Electro-Communications, oishi@kaji-lab.jp  
Masahiro KOGE, The University of Electro-Communications  
Sugarragchaa KHURELBAATAR, The University of Electro-Communications  
Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications

While numerous methods were proposed to stimulate vestibular sensation and somatosensory system to enhance motion sensation in the contents with visual movement, they have common issues such that the size of system is large and the presentation area is limited. To cope with these issues, we propose a method to enhance motion sensation by pulling the clothes.

**Key Words:** Haptic, Tactile, Pulling clothes, Self-motion

### 1. はじめに

ゲームや映画などの視聴覚コンテンツにおいて、コンテンツの臨場感を高めるためにマルチモーダルな感覚を提示することは重要である。特にレースゲームなどの視覚的移動を伴うコンテンツにおいては自身の動きに関する総合的な感覚である「自己運動感覚」が臨場感の鍵となると考えられる。自己運動感覚の要素としては、視覚によって推定される速度感覚、前庭感覚や体性感覚によって提示される加速度感覚が挙げられ、様々なエンターテインメント施設において視覚の手がかりを提示するだけでなく、映像に合わせてユーザの身体を直接駆動することで前庭感覚や体性感覚への提示も行っている。しかしこのような装置は全身を駆動するために大掛かりになりがちであり、家庭などの身近な場所で気軽に楽しむことは難しい。

本研究では前述の自己運動感覚の要素のうち体性感覚に起因するものに着目し、自己運動感覚の提示をより低コストな装置で実現することを試みる。体性感覚は深部感覚と皮膚感覚に分けられる。レースゲームなどのコンテンツを考えると、加速に伴って身体は後方に引かれ、また背もたれに押し付けられるため、深部感覚と皮膚感覚がともに生じることがわかる。このことから身体全体を後方に牽引することで深部感覚および皮膚感覚へ提示し、自己運動感覚を提示できる可能性が考えられる。

本稿では、衣服を牽引することで衣擦れによる皮膚感覚と牽引による深部感覚を刺激し、身体の広範囲へ自己運動感覚を提示する手法を提案する。さらに提案した手法で提示した感覚がユーザにどのような物理量として知覚されるかを実験によって検証する。

### 2. 関連研究

視覚刺激のみで自己運動感覚を向上させる例として、ユーザにベクションを生じさせる取り組みが数多く存在する[1][2][3][4]。ベクションとは運動する視覚刺激を観ることによって自分自身は移動していないのに自己運動感覚を感じる錯覚である。しかしベクションのみを用いる場合、十分な強度を出すと前庭感覚や体性感覚との矛盾から映像酔いなどの現象が生じることがある。このためベクション以外の方法で自己運動感覚を補強する必要があると考えられる。

前庭感覚や体性感覚を刺激する研究の例として、モーションプラットフォームを用いて自己運動感覚を向上させる取り

組みが行われている[5][6]。しかしモーションプラットフォームはユーザ自身を大きな機構によって駆動する形態をとるため大掛かりな装置となってしまう。

前庭感覚をコンパクトな装置で刺激する手法として、前庭器官を電気刺激することによって自己運動感覚を提示する手法が存在する[7][8]。しかし前庭電気刺激は安全性の観点から1日の合計刺激時間や持続刺激時間に制限があり、現時点では普及のハードルは高いと言える。

体性感覚の要素のうち皮膚感覚を刺激することで自己運動感覚を生じさせる例として、取り外し可能な簡易的装置を椅子に装着することで、振動感覚や触覚の流れ場を提示する取り組みがある[9][10]。しかし振動による皮膚感覚は本来コンテンツ内に存在しないものであり、こうしたコンテンツ自体へのノイズをコンテンツ鑑賞中に許容できるかどうかという課題が考えられる。

体性感覚の要素のうち深部感覚を刺激する例として、Danieauらは座席に座ったユーザに対して身体各所を力覚提示装置で刺激する試みを行っている[11]。身体の広範囲に力覚を提示することによって、自己運動感覚を向上させることが可能となる。ただしこれは力覚提示装置で手掌部や首を直接駆動しており、前述の振動提示と同様、刺激そのものはコンテンツ内に存在しないものであると考えられる。

我々の提案する手法では衣服を牽引することによって生じる衣擦れと牽引力によって体性感覚を刺激することで、簡易的に自己運動感覚を向上させることが可能である。また衣服を媒体とすることによって、皮膚感覚に関して身体の広範囲に提示を行うことが可能であることから、本手法はユーザの自己運動感覚をより効果的に向上させることが可能な手法であると考えられる。

### 3. 衣服牽引装置

#### 3.1 システム構成

本システムの構成を図1・図2に示す。本装置はギアヘッド付きモータ (Maxon社製, RE25 φ25mm, 10W, GP26B φ26mm, ギア比 19:1), モータドライバ (Okatech社製, JW-143-2), ボビン, ガイド, ケブラー糸, 糸を衣服に取り付けるためのナスカン, マイクロコントローラ (NXP社製, mbed NXP LPC1768), ロードセル (エー・アンド・デイ社製, LC-1205-K020) とデジタルインジケータ (エー・アンド・デイ社製, AD-4532B) から構成される。

本装置は図 3 のように椅子の背もたれ後方に設置し、ガイドを介してナスカン・ロードセル・糸の 3 点をユーザまで伸ばすことができる。衣服に固定したナスカンと糸をモータによって巻き取ることで衣服を牽引し、身体に後方への牽引力や振動を提示する。マイクロコントローラから DA コンバータ (Linear Technology 社製, LTC1660) を介してそれぞれのモータドライバに指令信号を送りモータを電流制御することによって、モータの糸を巻き取る強さを任意に定めることが可能である。2つのモータはそれぞれ左右の肩に対応しており、1つのモータで最大約 18N の力を提示することが可能である。初期状態ではロードセルの重量 (0.3kg) によって約 2N の牽引力が身体へ提示される。

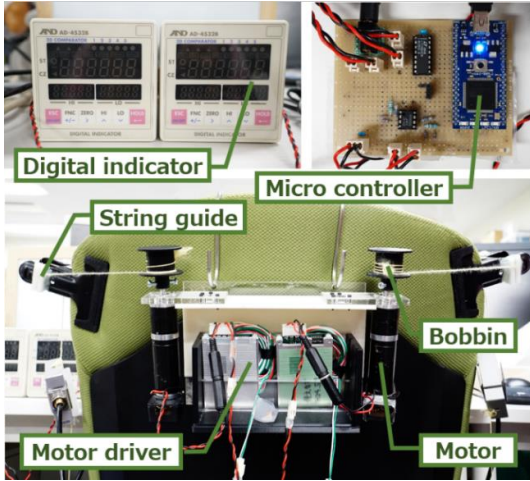


Fig. 1 Pulling clothes system

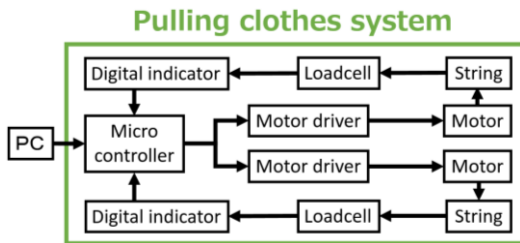


Fig. 2 Structure of the system

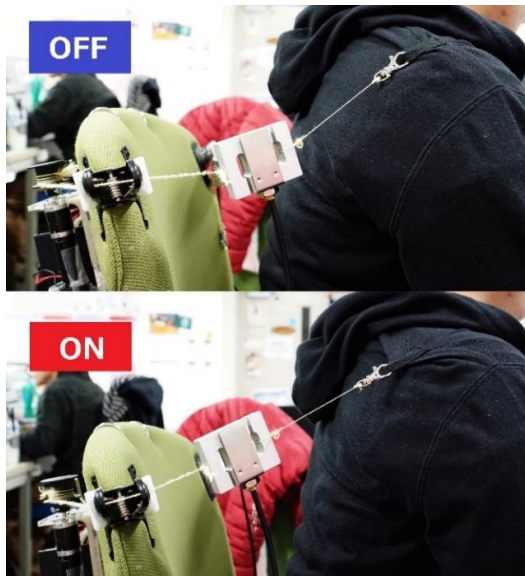


Fig. 3 Condition of pulling clothes

### 3.2 フィードバック制御

本装置はガイドを介して身体に牽引力を提示しているため、糸とガイド間に摩擦などが生じてしまいモータに指示した力どおりに身体に牽引力を与えることができていない可能性がある。そこでロードセルとデジタルインジケータを用いてフィードバック回路を設計し PD 制御を行うことで目標値へと収束させる。これによって身体に提示される牽引力が糸の摩擦やモータの個体差などにうける影響を軽減している。PD 制御の式は以下のとおりである。

$$F = P \times (x_{goal} - x) - D \times (x - x_{before}) \quad (1)$$

ここで、 $F$  はモータへ指示する牽引力、 $P$  は比例係数、 $D$  は積分係数、 $x_{goal}$  は目標の牽引力、 $x$  は現在の牽引力、 $x_{before}$  は前フレームの牽引力である。

#### 3.2.1 牽引力の誤差

実際に本装置を人間に装着して牽引力を測定した。図 4 にフィードバック制御無しの左右のモータの牽引力、図 5 にフィードバック制御有りの左右のモータの牽引力を示す。フィードバック制御無しの状態では、指示した通りの牽引力を提示できずかつ左右で大きさの異なった牽引力を提示していた。対してフィードバック制御有りの状態では、指示した通りの牽引力が提示可能でありかつ左右の牽引力もほぼ同じ大きさで提示可能であった。これによりフィードバック制御によってほぼ指示通りの牽引力が身体へ提示可能となった。

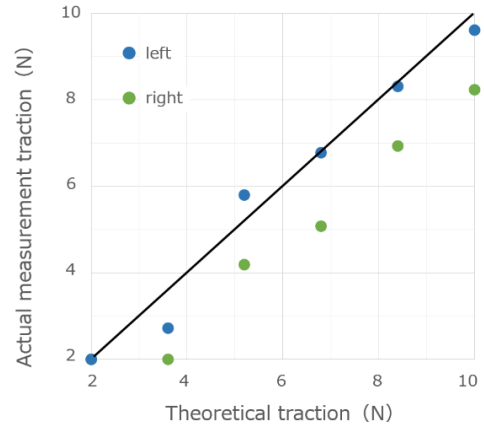


Fig. 4 Traction of the motor without feedback control

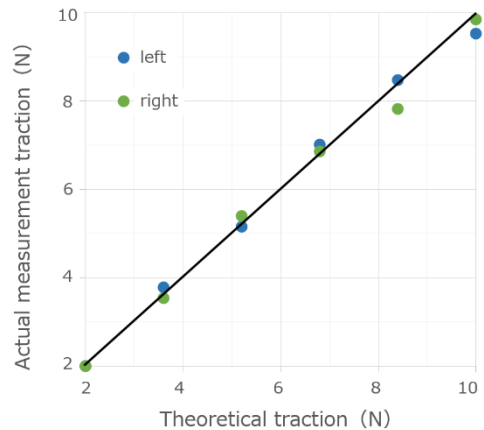


Fig. 5 Traction of the motor with feedback control

### 3.2.2 牽引力の応答速度

3.2.1と同様に本装置を人間に装着して、10N・18Nを目標値としたときのフィードバック制御の応答データを0.01秒ごとに10秒間取得した。フィードバックループの周期は1kHzとした。右側のモータのデータを図6・図7に示す。それぞれの応答速度は10Nの力を目標としたとき約0.16s, 18Nの力を目標としたとき約0.24sとなった。強い牽引力を提示するほど応答速度は遅くなるが、最大でも約0.24sの遅延なので制御する力によっては支障がない。視聴覚コンテンツなどに合わせて提示する際に支障が出る場合は、視聴覚コンテンツ側に遅延の分だけオフセットを設けることで視覚と力覚のズレを防ぐことが出来ると考える。

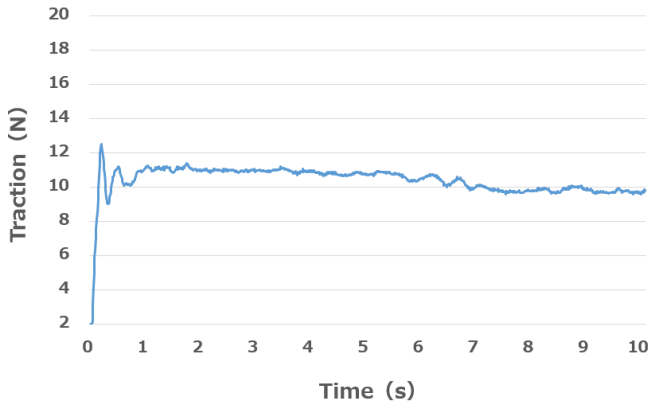


Fig. 6 Response of motor (10N)

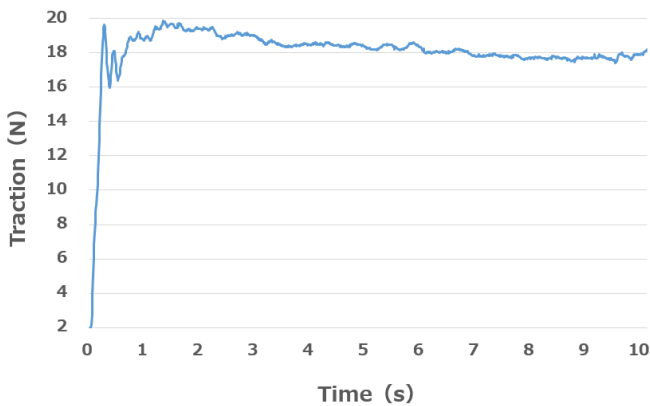


Fig. 7 Response of motor (18N)

## 4. 評価実験：牽引力によって生じる移動感覚

本研究では視覚的移動を伴うコンテンツにおいて、乗り物が加速する際の慣性力として身体に牽引力を提示することによってユーザの自己運動感覚を向上させることを目的としている。本来慣性力は加速度に合わせて我々の身体に提示されているが、バーチャル空間においても実世界と同様に慣性力を提示することで自己運動感覚が向上するかは定かではない。一方物体が移動する際には位置・速度・加速度の3つの量が変化するため、どの変化量に合わせて牽引力を提示するべきなのかを検討する必要がある。そこで本実験では視界の移動に合わせて牽引力を提示し、どの移動変化量に合わせて牽引力を提示するべきなのかを検討した。

## 4.1 実験環境

本実験で用いる視覚刺激はゲームエンジン Unity (Unity Technologies 社, <http://japan.unity3d.com/>) によってレンダリングし、HMD (Oculus VR 社, Oculus Rift Development Kit 2, 解像度 1920×1080 (片目 960×1080), 水平画角 90°, 対角画角 110°) で提示した。10m 四方の立方体内に、直径 0.1m の球を 0.1 個/m<sup>3</sup>でランダムに配置した。この立方体を進行方向に 25 個並べ、その中で視点を正弦波状に移動させることで提示した (図 8)。なお、移動の最大速度を約 60km/h<sup>3</sup>とするために視点は振幅 100・周波数 0.1Hz の正弦波状に前後移動させた。また、視覚刺激の中心には注視させるために十字の指標を提示した。

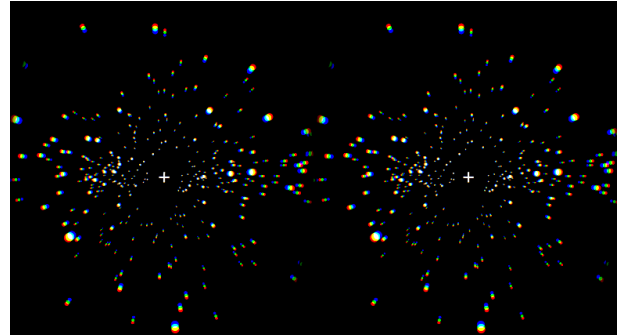


Fig. 8 Visual stimuli (left : view of left eye, right : view of right eye)

牽引力提示には今回試作した衣服牽引装置を用い、3.2 で述べたフィードバック制御を行うことで、正弦波状の牽引力を提示した。シリアル通信を介して Unity から動作指令信号をマイクロコントローラに送信することでモータの制御を行い、視覚刺激に合わせて約 2N (初期状態) から約 18N の大きさで周波数 0.1Hz の正弦波状の牽引力の提示を行った。本装置では後方 1 方向のみにしか牽引ができないため、牽引力が負になる場合は約 2N の力を提示した。

物体が移動する際に変化する位置・速度・加速度の3つの量は、互いに微分・積分の関係となっており、位置を時間微分すると速度、速度を時間微分すると加速度になる。また正弦波の特性として、1回微分をするたびに  $1/2\pi$  ずつ位相が進むという性質がある。本実験ではこれらの性質を利用し、被験者に正弦波状に提示した視覚刺激・牽引力の位相を調整してもらうことで、どの移動変化量に合わせて牽引力を提示するべきなのかを数値的に評価できるようにした。つまり提示する映像の正弦波と被験者が自然と思う牽引力の正弦波の位相差が、 $0\pi$  に近ければ変位感、 $1/2\pi$  に近ければ速度感、 $\pi$  に近ければ加速度感を生じていると解釈できる (図 9)。

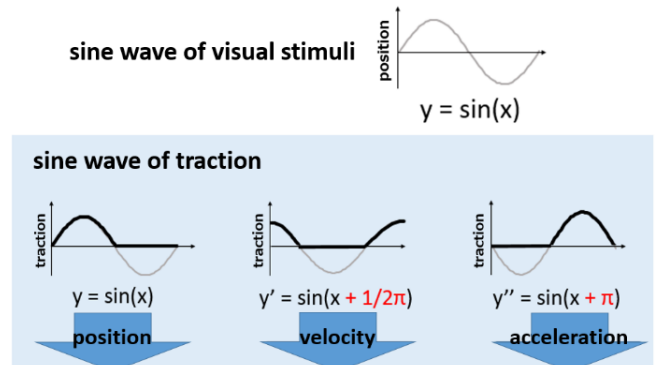


Fig. 9 Three factors varied by phase differences of sine wave



## 4.2 実験手順

図 10 に示すように、被験者は本装置が搭載された椅子の前に用意された椅子に座った。これは糸が牽引された際にロードセルがガイドに触れてしまうのを防ぐためである。まず始めに、被験者は実験者から実験に関する説明を受け、酔いの度合いを確認する Simulator Sickness Questionnaire[12] (以下、SSQ) に回答した。その後、HMD とノイズキャンセリングヘッドホン (BOSE 社製、QuietComfort15) を着用し、肩部にナスカン装着した。実験中はモータの駆動音を遮蔽するため、ヘッドホンからホワイトノイズを提示した。

まずテンキーの 1 を押すと映像と牽引力の提示が始まる。映像の正弦波の初期位相は固定されており、牽引力の正弦波の位相はランダムであった。被験者は正弦波状に移動する映像に対して正弦波状に変化する牽引力の位相を自然と思うように目の前に用意されたキーボードで調整した。これを 1 試行とし、合計 5 試行を行った。実験終了後、被験者は簡単な質問と再度 SSQ に回答した。被験者は 21 から 25 歳の男性 9 名、女性 3 名の計 12 名であった。



Fig. 10 Condition of experiment

## 4.3 結果・考察

図 11 に被験者が回答した映像の正弦波との位相差を示す。赤線が中央値を示し、箱が四分位点を、エラーバーが最大値・最小値を示す。横軸のアルファベットは各被験者を指す。実験の結果、8 割以上の被験者が提示する映像の正弦波と自然だと思える牽引力の正弦波の位相差を  $1/2\pi$  に近い値で回答した。つまりこれは 8 割以上の被験者が視覚刺激の「速度感覚」に合わせて牽引力を提示すると自然に感じると回答したということになった。

本来実世界で移動をしている際には「加速度感覚」に合わせて慣性力がかかるため、「速度感覚」に合わせて牽引力を提示すると現実とは異なった感覚提示になり違和感が生じるはずである。ところが多くの被験者が牽引力を提示する際には視覚刺激の「速度感覚」に合わせて提示すると自然に感じると回答する結果となった。これは我々の視覚では加速度より速度の方が知覚しやすいからであると考えられる。例えば自動車に乗って外の景色を眺めている際、自動車の速度は景色の移動する様子を眺めることで大方推測できるが、自動車の加速度は景色の移動する様子を眺めても速度に比べると推測し難い。今回の実験では視覚刺激に合わせて牽引力を調整してもらったため、多くの被験者は視覚刺激によって知覚しやすい「速度感覚」に合わせて牽引力を提示したときに自然に感じると回答したのだと考えられる。

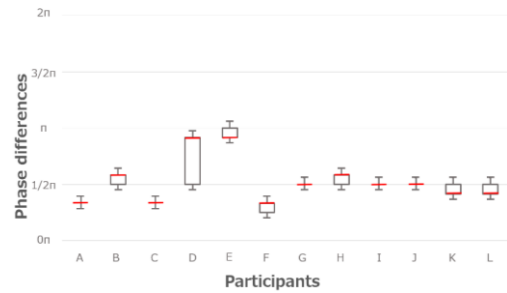


Fig. 11 Phase differences of sine wave between visual stimuli and traction

## 5. まとめ

本研究では、衣服を牽引することで衣擦れによる皮膚感覚と牽引による深部感覚を提示し、身体の広範囲へ自己運動感覚を提示する手法を提案した。実験結果より、視覚的移動を伴うコンテンツにおいて身体へ牽引力を提示する際には、実世界と同様に加速度感覚に合わせて牽引力を提示するのではなく、コンテンツの速度感覚に合わせた牽引力を提示すると自然であると感じられることが判明した。

今回は直進方向のみの自己運動感覚を提示したが、今後は右左折時の遠心力や急ブレーキの再現などをしていきたい。

## 謝辞

本研究は JST-ACCEL 「身体性メディア」プロジェクトの一環として行われた。

## 参考文献

- [1] A. Sugiura, K. Tanaka, H. Takada, T. Kojima, T. Yamakawa, M. Miyao : A Temporal Analysis of Body Sway Caused by Self-Motion During Stereoscopic Viewing, Universal Access in Human-Computer Interaction, pp. 246-254 (2015)
- [2] T. Nojima, Y. Saiga, Y. Okano, Y. Hashimoto, H. Kajimoto : The peripheral display for augmented reality of self-motion, International Conference on Artificial Reality and Telexistence, pp.308-309 (2007)
- [3] H. Ito, H. Takano : Controlling Visually Induced Self-Motion Perception : Effect of Overlapping Dynamic Visual Noise, Journal of PHYSIOLOGICAL ANTHROPOLOGY and Applied Human Science Vol. 23 No. 6, pp. 307-311 (2004)
- [4] B. E. Riecke, J. Schulte-Pelkum, F. Caniard, H. H. Bühlhoff : Towards Lean and Elegant Self-Motion Simulation in Virtual Reality, Virtual Reality, pp. 131-138 (2005)
- [5] Cable-driven parallel robots, Fraunhofer IPA : [http://www.ipa.fraunhofer.de/en/cable-driven\\_parallel\\_robots.html](http://www.ipa.fraunhofer.de/en/cable-driven_parallel_robots.html)
- [6] 浜松広報館 (エアパーク), 航空自衛隊 : <http://www.mod.go.jp/asdf/airpark/guide/simulator/>
- [7] 前田太郎, 安藤英由樹, 渡邊淳司, 杉本麻樹 : 前庭電気刺激を用いた感覚の提示, バイオメカニズム学会誌 Vol. 31 No.2, pp.82-89 (2007)
- [8] 青山一真, 安藤 英由樹, 飯塚 博幸, 前田 太郎 : 前庭電気刺激における逆方向不感電流を用いた加速度感覚の増強, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 19(3), pp.315-318 (2014)
- [9] A. Israr, I. Poupyrev : Tactile Brush: Drawing on Skin with a Tactile Grid Display, CHI '11 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (2011)
- [10] 雨宮智浩, 広田光一, 池井寧:座面上の触覚現運動が及ぼす視覚誘導性自己運動感覚の速度知覚変化, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 18(2), pp. 121-130 (2013)
- [11] F. Danicau, J. Fleureau, P. Guillotel, N. Mollet, A. Lécuyer, M. Christie, HapSeat: Producing Motion Sensation with Multiple Force-feedback Devices Embedded in a Seat, in Proceedings of the 18th ACM symposium on Virtual reality software and technology, pp. 69-76 (2012)
- [12] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, M. G. Lilienthal : Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness, The International Journal of Aviation Psychology Vol. 3, pp.203-220 (1993)