

前庭感覚ディスプレイによる身体運動表現に関する研究

所属：システムデザイン研究科 ヒューマンメカトロニクスシステム学域

氏名：川真田 晃久

1. はじめに

近年の情報技術の進展により、多感覚に互る情報を提示するディスプレイの研究が進展しつつある。それらの技術を適切に構成し、多感覚な刺激を統合的に生成できれば、高品質な臨場感を体験することが可能になると考えられる。また、随意運動が追体験可能となれば他人が選択的に見てきた多様な世界を同様な立場で経験する可能性が拓ける。これにより、バーチャル旅行やテレロボティクスなどの応用例の実現の足掛かりとなる。本研究では、多感覚への刺激提示を可能とするシステム（五感シアター）の一部として、前庭感覚に刺激を与える可動座席を開発し、他の提示デバイスと統合することで、多様な身体運動感覚を表現することを目指している。身体運動の中でも日常的な動作である歩行運動と走行運動の表現を中心に行なっている。

2. 前庭感覚ディスプレイデバイス

2.1 システム構成

前庭感覚に刺激を提示するために、2つのデバイス、すなわち可動座席（3自由度）と下肢部刺激装置（2D下肢駆動ボード、足裏刺激提示装置）を開発した。可動座席は、VR空間中での体幹および頭部を中心とした運動を模擬し、下肢部刺激装置は、2D下肢駆動ボードが空間移動に関する模擬を行い、足裏刺激提示装置は足裏が受ける皮膚感覚提示を行うことで歩行、走行に関連する情報を模擬する。これらの運動情報の提示を連動させることで身体の相対運動（姿勢変化）も生成する新規のモーションベースシステムを構成している（図1）。

2.2 可動座席

可動座席（図2、3D-Seat）は、3本の電動直動アクチュエータと中央シリンダーで構成されている。可能な運動は、上下並進運動と、ピッチ、ロールの回転運動である。各電動アクチュエータは、軸方向に最高速度 200 [mm/s]、ストローク約 100 [mm]で伸縮する。また、中央シリンダーが天板の重心を鉛直軸上に拘束して、ヨー軸運動を制限するため、受動的な直動ガイドが中央に設置されている。

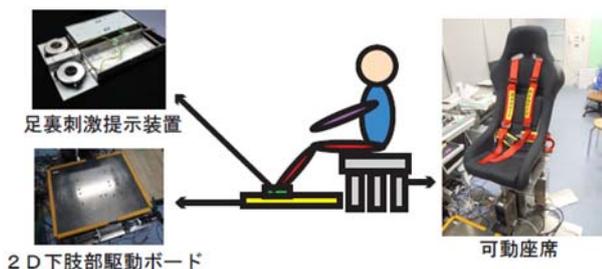
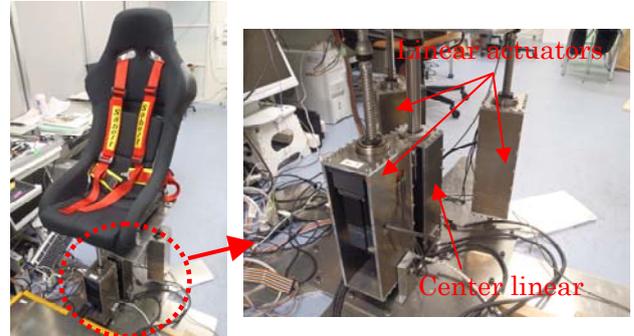


図1：モーションベースシステム



(a) 外観

(b) 基部の直動機構

図2：可動座席

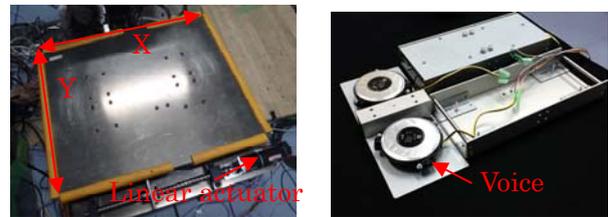


図3：2D下肢駆動ボード

図4：足裏刺激提示装置

2.3 2次元下肢駆動ボード

2D 下肢駆動ボード（図3）は、2つのDCモータによって天板が2次元に並進運動し、ボード上に足裏面を設置することで、体験者に足の運動と地面の運動を疑似的に提示する。また、垂直方向の運動も加える予定である。

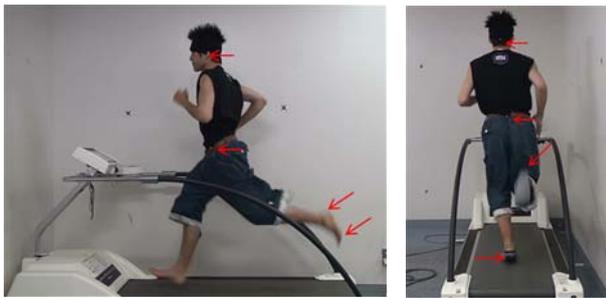
2.4 足裏刺激提示装置

足裏刺激提示装置（図4）は、足裏の接触面をボイスコイルで振動させ、歩行時などの足裏の地面に対する接触時の皮膚感覚の提示を行う。

3. 運動感覚の表現

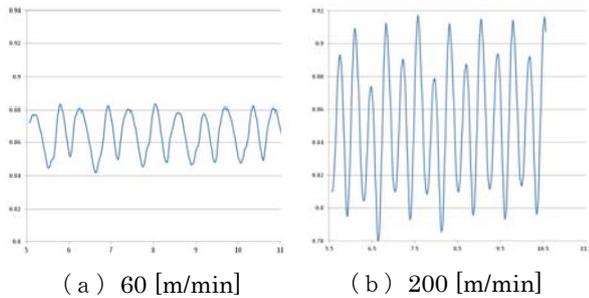
3.1 運動の計測

運動表現の基礎データを得るため、実際の運動を計測した。計測方法は、トレッドミル上での歩行、走行の運動軌道をモーションキャプチャーシステムを用いて計測するものだ。計測は、側面と背後から行ない、頭部、腰、足にマーカーを貼付し軌道を記録した（図5）。計測結果は、60 [m/min]で歩行した場合は腰の上下運動は約 30～50 [mm]の振幅であり、200 [m/min]で走行した場合は腰の上下運動は約 60～130 [mm]の振幅であることが分かった。図6は、60 [m/min]での歩行運動と 200 [m/min]での走行運動の腰の上下運動の計測結果の例である。これらの図は、側面から計測した結果であり、走行運動では左右の足の交互運動を反映して振幅が変化する軌道となっている。



(a) 側面からの計測 (b) 背後からの計測

図5：計測の態様



(a) 60 [m/min] (b) 200 [m/min]

図6 腰の計測軌道例

3.2 歩行表現

追体験の対象とする運動を再現する立場から着手すべきことには、その運動の複製が含まれる。可動椅子で体幹の運動を再現するなら、上記の計測結果の軌道で椅子を運動させればよいが、歩行運動する身体の感覚体験としては、不適切に過大であることが予備実験からわかった。これは、随意運動と受動運動では、感覚情報の扱いが異なるためであると考えられる。ここでは、まず主観評価で歩行の感覚として適切となる振幅を調整法により設定した。図7は、設定された歩行の表現であり、直動アクチュエータの運動軌道を示している。3本のアクチュエータのうち、左右後方部のアクチュエータを交互に駆動し、足の着地時の衝撃を身体に伝える運動となっている。青線、赤線は、それぞれ左右後方部のアクチュエータの変位量である。振幅は0.3 [mm]で、0.6 [s]ごとに左右のアクチュエータが伸長する。アクチュエータ間の距離は320 [mm]で、左右交互に着地感を提示することで、左右の脚で歩行している感覚を表現している。実際の歩行運動の腰の動きは、振幅が平均約40 [mm]の上下運動だが、表現した歩行動作は0.3 [mm]であり、実際の歩行運動の振幅の100分の1程度の振幅で表現できることが示唆された。

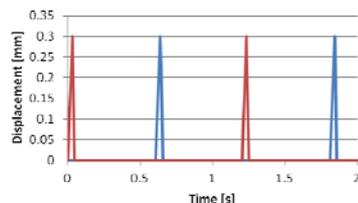


図7 直動アクチュエータの変位（歩行運動表現時）

3.3 走行表現

走行運動の表現も、実際の運動を再現することから着手した。その結果、歩行動作の表現と同様に、走行運動する身体の感覚体験としては、明確に過大である結果となった。これは、走行運動する身体の感覚体験としては、振幅を30

mmまで減少しても、揺れは明確に過大と感じられる。そこで、調整法により走行運動として適切な感覚を与える可動椅子の運動を設定した。図9は、設定された走行の表現であり、直動アクチュエータの運動軌道を示している。3本の直動アクチュエータは、座席が取り付けられている基部板の2等辺三角形の頂点の位置にボールジョイントで結合されており、椅子前方部が図8(a)、後方部の2頂点が(b)、(c)である。振幅は、前方部で約

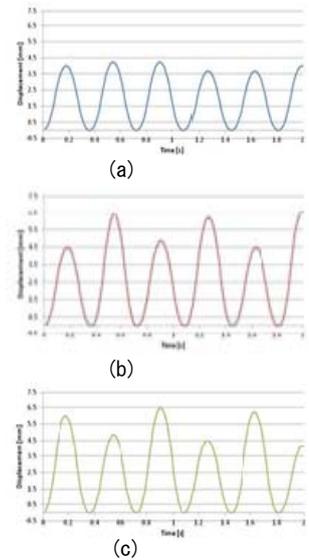


図8：直動アクチュエータの変位（走行運動表現時）

4 mm、後方部は約6 mmと4.5 mmが交互に現れる。また、振幅の揺らぎも身体運動の表現に効果的であると考えられ、平均20%の振幅の変動を含めることが適切であると感じられた。実際の走行時の運動と比較して、平均で約8%の振幅となった。随意的走行運動時と異なり、受動的な運動の知覚は主観的な受容感度が高くなっていると考えられる。また、実際の運動の揺らぎの平均は10%程度であったが、可動椅子での表現では、平均約20%程度の揺らぎが適切と感じられており、変動に対する受容特性も異なることが示唆された。

3.4 まとめ

運動感覚を可動座席で表現すると、実際の運動と比較して歩行動作で100分の1、走行動作で20分の1の振幅で表現することができる。これは、随意的運動時と異なり、受動的な運動の知覚は主観的な受容感度が高くなっており、変動に対する受容特性も異なるためと考えられる。

4. 公開実験

本システムは、2011年10月に科学未来館に開催されたアジアグラフ2011で公開実験に供された(図9)。目的は、運動感覚提示の実験システムの中間的な評価を行うものである。公開実験では、主に歩行運動を採り上げ、身体の揺動による移動感覚の提示について検証した。具体的な展示内容は仮想旅行体験となっており、身体運動感覚は多感覚提示の主要要素となっている。



図9 公開実験の様子