

Augmented Elevator : エレベータを用いたモーションプラットフォームの開発

高下昌裕^{†1} 蜂須拓^{†1,2} 梶本裕之^{†1,3}

本研究ではエレベータを利用した新たなモーションプラットフォームの開発を行う。エレベータの設置台数は非常に多く、至る所で利用できる点で従来のモーションプラットフォームより優れている。本稿では、エレベータをモーションプラットフォームとして利用する際の制約のひとつである有限な可動閥に対し、視覚誘導性自己運動感覚を用いることでエレベータによる移動感覚強度保ちつつ、ユーザに移動方向のみを錯誤させることで解決を試みる。被験者実験の結果、エレベータの移動方向と反対方向に移動する視覚刺激を提示することでエレベータの移動方向を錯誤させることが可能であることが示唆された。またこのときの移動感覚強度についても検証したところ、視覚刺激のみで錯誤させるときよりも強い移動感覚が生起することが明らかとなった。さらに本現象を用いたアプリケーションとして無限上昇するエレベータによる宇宙旅行体験を提供するコンテンツを開発した。

Augmented Elevator : Development of the motion platform with elevator

MASAHIRO KOGE^{†1} TAKU HACHISU^{†1,2}
HIROYUKI KAJIMOTO^{†1,3}

This paper presents Augmented Elevator, which uses a conventional elevator as a motion platform. Using the elevator is more practical than using a complex mechanical motion platform in terms of setting cost and space since there are plenty of elevators all over the place. This paper describes an approach to expand perceived range of motion of the elevator by visual illusion of self-motion (vection). The first experiment shows that it is possible to change the perceived direction of the elevator by providing optical flow whose direction is opposite to that of the elevator. The second experiment shows that the intensity of the illusion induced by both of the elevator and vection is stronger than that induced by only vection. As an application, we achieved the infinitely ascending elevator, which provides experience of a cosmic journey.

1. はじめに

自動車や航空機の模擬訓練やビデオゲーム等のバーチャルリアリティコンテンツにおいて、モーションプラットフォームを用いた位置、速度、加速度といった移動感覚提示が広く行われている[1][2]。一般にモーションプラットフォームは、操縦席やユーザが収容された部屋等を大規模な運動機構で駆動することによって移動感覚を提示する。コンテンツのリアリティを向上できる一方で、設置に関してコストが高く、大きなスペースを必要とする。Cheng らの Haptic turk[3]ではモーションプラットフォームのアクチュエータ部分を人が担うことによって高コスト、設置スペースの問題を解決しているが、利用には人が必要であり、また疲れによる可動時間の制限や安全面に問題が残る。

そこで我々はエレベータをモーションプラットフォームとして利用することを考えた。日本のエレベータの設置台数は約 67 万台 (2011 年 3 月現在[4]) と非常に多く、設置に関して新たなコストやスペースを必要としない。その

一方で、エレベータをモーションプラットフォームとして利用する場合、以下の制約がある。

1. 連続で上昇・下降できる距離が建物の高さに依存する (可動閥に制限がある)。
2. 提示できる移動方向が上下方向のみ (1 自由度)。
3. 一定パタンの変位、速度、加速度提示しか行えない (移動強度の階調性が乏しい)。
4. 階と階を移動するため断続的な移動感提示になる。

本稿では、以上の制約のうち 1 を視覚誘導性自己運動感覚 (ベクション) [5]を利用して解決を試みる。具体的にはエレベータの移動方向と反対方向に移動する視覚刺激を提示することで、エレベータによる移動感覚の強度保ちつつ、ユーザに移動方向のみを錯誤させることを行う。これにより無限上昇による宇宙の旅や無限降下による深海探査等、通常無限の可動閥が必要となるコンテンツの製作が可能となる。

^{†1} 電気通信大学

^{†2} 日本学術振興会特別研究員

^{†3} 科学技術振興機構さがけ

^{†1} Graduate School, The University of Electro-communications

^{†2} JSPS Research Fellow

^{†3} Japan Science and Technology Agency (JST)

2. 先行研究

我々は乗り物に乗っている際、その乗り物が移動していることを主に視覚、体性感覚および前庭感覚を手がかりに感じることができる。移動感覚知覚において視覚的な手がかりが優位に寄与することが知られている。Lishman らは、体性・前庭感覚と視覚との間に矛盾を生じさせる実験を行ない、被験者が身体姿勢を制御する上で視覚の手がかりに頼る傾向にあることを示した[6]。この現象は視覚誘導性自己運動感覚（ベクション）と呼ばれ、例えば、電車に乗っている状況で対面の電車が動き出したとき、自身の乗車している電車が動いていないにも関わらず動いたように感じてしまう経験が挙げられる。これまでにベクションを用いた移動感覚の強化[7]やナビゲーション[8]が開発されている。

これまでにエレベータと視覚刺激を組み合わせたエンタテインメントシステムは提案されており、Ars Electronica Elevator ではエレベータの床に上昇・下降に応じて搭乗者がインタラクティブに楽しめる映像を投影している[9]。また、エレベータに搭乗した際にエレベータの床に床が抜ける映像を投影し、落下の恐怖を体験させるといったものもある[10]。しかしこれらはエレベータの移動方向の錯誤は利用されていない。

久米らは昇降台とヘッドマウントディスプレイ（HMD）を組み合わせたモーションプラットフォームを開発した[11]。被験者実験より、昇降台の移動方向と同方向あるいは反対方向の視覚刺激を提示した際の移動感覚を調査し、提示する視覚刺激によってユーザに昇降台の移動方向を錯誤させることが可能であることを示唆した。久米らの実験結果は前章で述べた本研究の基本概念を支持するものである。一方で、昇降台で提示した加速度が、ヒトが加速度感じる閾値付近（約 0.1m/s^2 ）[12][13]であったのに対し、エレベータではより大きい加速度（最大で約 0.8m/s^2 、3.1 節参照）が提示される。また移動方向の錯誤が生じる際の移動感覚強度に関しては言及されていない。そのため、我々はまず久米らの実験と同様にエレベータの移動方向と反対方向に移動する視覚刺激を提示することによって、ユーザにエレベータの移動方向を錯誤させることが可能であるかを検証した（3 章）。そして、錯誤が生じる状況でのユーザの主観的な移動感覚強度を測定した（4 章）。

3. 実験 1：視覚による移動感覚提示によるエレベータの移動方向錯誤の検証

本実験では、エレベータの移動方向と反対方向に移動する視覚刺激を提示することで、被験者にエレベータの移動方向を錯誤させることができるかを検証した。

3.1 実験環境

本実験では電気通信大学西 3 号館（5 階建て）に設置さ

れているエレベータ（三菱電機製、横 140cm、縦 140cm、高さ 230cm）を利用して行った。エレベータの壁面に加速度センサ（ストロベリー・リナックス社、アナログ 3 軸加速度センサモジュール、Freescale MMA7361LC、測定レンジ $\pm 1.5\text{G}$ ）を取り付け、マイクロコントローラ（NXP Semiconductor 製, mbed LPC1768）より $1000\text{Hz}(\text{samples/sec})$ でその値を取得した。図 1 にエレベータが 1 階分（約 350cm）上昇・下降した際の加速度を示す。横軸は時間、縦軸はエレベータの加速度を示す。本エレベータには最大で約 0.82m/s^2 の加速度が生じており、ヒトが加速度を感じる閾値（約 0.1m/s^2 ）[12][13]よりも十分に大きい加速度が提示可能であった。また、上昇と下降でほぼ加速度が対称に変化することが観察できた。

HMD（Oculus VR 製、Oculus Rift、解像度 1200×800 （片目 640×800 ）、水平画角 90° 、対角画角 110° 、<http://oculusvr.com>）を用いて視覚刺激を提示した。視覚刺激の生成にはゲームエンジン Unity（<http://unity3d.co-m>）を用いた。Unity 内では、使用したエレベータと同様の大きさのバーチャルエレベータ（VE: Virtual Elevator）を再現し、ステレオカメラ（カメラ距離 6.4cm）を直方体の中央、高さ 170cm の位置に設置した。マイクロコントローラとのシリアル通信より取得したエレベータの加速度 a をもとに、次式よりエレベータの変位 y をシミュレーションした。

$$\begin{aligned} v &= kat + v_0 \\ y &= \frac{1}{2}kat^2 + vt + y_0 \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 v は速度、 v_0 は初期速度、 y_0 は初期位置、 k は加速度係数である。VE の移動方向は、 $k=1$ でエレベータと同方向、 $k=-1$ で反対方向、 $k=0$ で停止になる。Unity の更新周期は約 16.6ms であった。図 2 にエレベータが上昇した際の、変位 y のシミュレーションの結果を示す。実際のエレベータの変位は約 350cm であったが、シミュレーションの結果は約 285cm であった。この差は Unity の更新周期が十分に早くなかったことが原因であると考えられる。加速度の取得および変位のシミュレーションを別スレッドで行う等で精度を向上できると考えられるが、今回は簡単のため、このままのセットアップで実験を行った。

視覚による移動感覚を提示するために、VE の壁面に図 3 に示すような 23cm 間隔の白黒の縞模様を描画した。本実験では変位 y の分だけ縞模様を上下方向に移動させた。

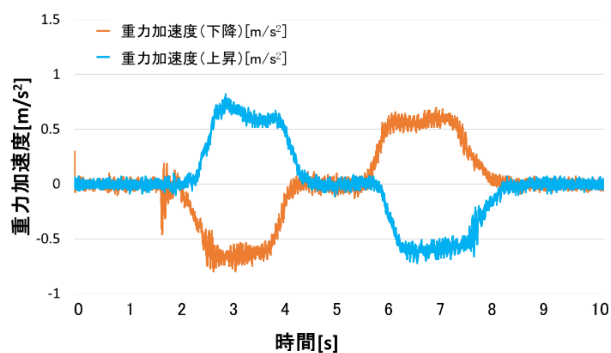


図 1 エレベータが上昇・下降する際の加速度

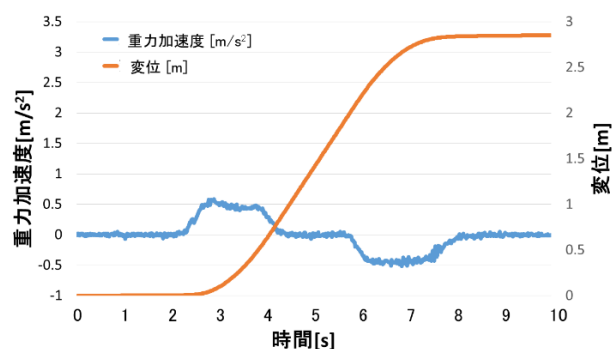


図 2 エレベータの変位のシミュレーション

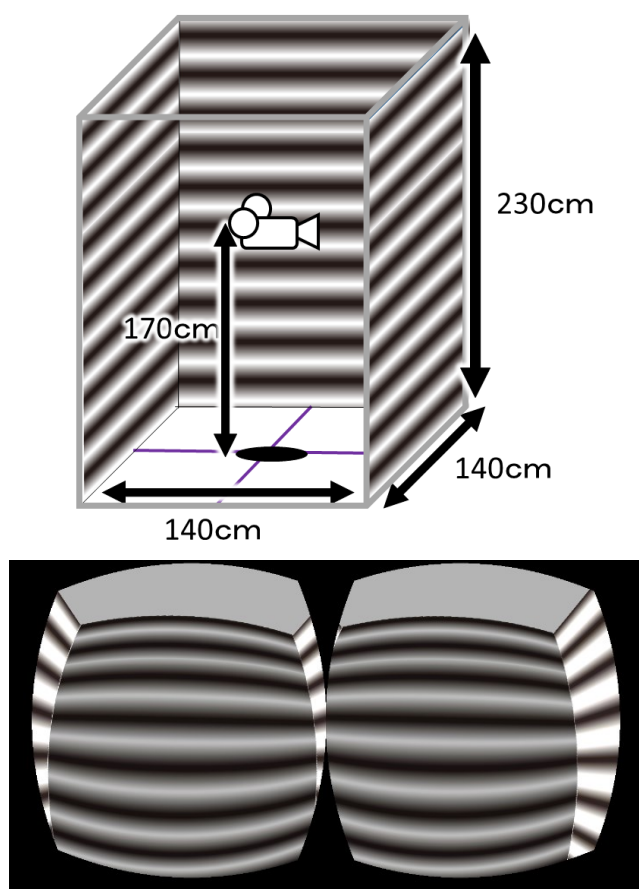


図 3 VE における視覚提示 (上), HMD による視覚提示 (下)

3.2 実験条件

本実験では実エレベータ (RE: Real Elevator) の移動方向を 3 条件 (上昇, 下降, 停止) 設定した。ただし, 上昇, 下降いずれも 1 階分であった。同様に VE の移動方向も 3 条件設定した。したがって計 9 条件 (RE 移動方向 3 条件 × VE 移動方向 3 条件) を設定した。なお, RE 停止条件において, VE の上昇, 下降はあらかじめ RE 上昇条件の加速度変化を 1kHz で 10 秒間記録したものを Unity に送信して VE の変位をシミュレーションした。

3.3 実験手順

図 4 示すように, 実験者および被験者はエレベータに乗った。被験者は実験者から実験の内容についての説明を受け, HMD とヘッドホン (BOSE 社, QuietComfort15) を着用した。エレベータのアナウンス音を遮蔽するため, 実験中はヘッドホンからホワイトノイズが提示された。実験者が 9 条件のいずれかを提示し, これに対して被験者はエレベータが動いたと感じた方向を上昇, 下降, 停止の 3 択で解答した。これを 1 試行とし, 実験者は RE 上昇-VE 上昇, RE 下降-VE 下降, RE 停止-VE 停止条件の 3 条件をそれぞれ 1 試行ずつ, 残り 6 条件を 3 試行ずつ, 計 21 試行をランダムに提示した。被験者は全試行終了後にアンケートに回答した。実験時間は被験者 1 名あたり約 10 分であった。被験者は 22 から 25 歳の男性 8 名であった。



図 4 実験の様子

3.4 実験結果・考察

表 1 に本実験での全条件に対する被験者の回答方向の割合を示す。

3.4.1 RE と VE の移動方向が同じであった場合

表中の青色で示した条件に関して, RE と VE の移動方向が同じであるため, 我々は回答方向がその方向に 100%に

表 1 実験結果（実験 1：移動感覚方向）

		VE								
		上昇			下降			停止		
回答方向		上昇	下降	停止	上昇	下降	停止	上昇	下降	停止
RE	上昇	75%	25%	0%	51.4%	45.8%	0%	70.8%	29.1%	0%
	下降	41.6%	58.3%	0%	25%	75%	0%	4.1%	98.8%	0%
	停止	41.6%	4.1%	54.1%	0%	54%	45.8%	12.5%	12.5%	75%

なることを予想した。しかし、本実験結果は我々の予想に反するものとなった。

この原因として、被験者が実験中に混乱してしまった可能性が考えられる。本実験では RE と VE の移動方向が反対となる条件（3.4.4 節）があり、主に体性・前庭感覚と視覚の矛盾からどちらの手がかりに頼るべきか分からなくなり、回答に自信がなくなつたと考えられる。実際にアンケートの回答より「感覚が良く分からなくなり、回答が難しかった」や「混乱してしまい良く分からなくなった」等、複数の被験者から実験の途中から移動方向の回答に関して混乱したとの報告があった。

3.4.2：RE 停止条件かつ VE 上昇・下降条件であった場合

表中の緑色で示した 2 条件に関して、視覚的には上昇、下降の移動感が生じる一方で体性・前庭感覚的には移動感覚が生じないことから、我々は回答方向が停止もしくは VE の移動方向となることを予想した。本実験結果は我々の予想通りといえ、回答の割合はほぼチャンスレート（50%）であった。これは RE において、ベクションが生起していたことを示唆する。一方で、視覚による移動提示のみでは必ずしも移動感覚が生起しないことも示唆された。

3.4.3：RE 上昇・下降条件かつ VE 停止条件であった場合

表中の赤色で示した 2 条件に関して、本エレベータは人が加速度を感じる閾値（約 0.1m/s^2 ）[12][13]よりも大きな加速度が生じる（約 0.82m/s^2 ）ことから、回答は RE の移動方向となることを予想した。本実験結果は我々の予想通り RE の方向に高い回答率を示している。一方で RE の移動方向とは反対方向の回答もいくらかあった。これは 3.4.1 項で述べた被験者の混乱によるものと考えられる。

3.4.4：RE と VE の移動方向が反対であった場合

表中の黄色で示した 2 条件に関は RE と VE の移動方向が異なっており、本研究の基本概念を検証する条件であるといえる。回答方向の割合（RE の移動方向：VE の移動方向：停止）はおよそ 1:1:0 であった。つまり、試行のおよそ半分において RE の移動方向が錯誤されていたことが示唆された。また本実験では視覚提示のみでは必ずしも移動感

覚が生起しなかった（3.4.2 項）が、エレベータの動きが伴うと必ず移動感覚が生起した。

3.4.5：まとめ

本実験ではエレベータの移動方向と反対方向に移動する視覚刺激を提示することで、被験者にエレベータの移動方向をおよそ 50%の確率で錯誤させることが可能であった。本実験では視覚刺激に縞模様を用いたが、抽象的な模様よりも実際の風景のような現実世界に近い視覚刺激を用いた方がベクションの強度が大きくなることが指摘されている[14]。したがってより強いベクションを生起する視覚刺激を提示することで錯誤の確率を向上させることができると考えられる。また、本実験では実験条件の提示順を完全にランダムにしたため結論づけることは困難であるが、実験後半において錯誤の確率が上昇する傾向が見られた。これは被験者が徐々に視覚的な手がかりを頼りにするようになったためと考えられる。実用を考えた際、長時間あるいは長期間の体験を経ることで錯誤の生起確率を向上させることが可能であると考えられる。

4. 実験 2：視覚による移動感覚提示による移動感覚強度の測定

前実験から視覚による移動感提示によってエレベータの移動方向をある程度錯誤させることが可能であることが明らかになった。本実験では方向錯誤が生じている際の主観的な移動感覚強度を測定した。

4.1 実験環境

実験 1 と同様の環境で実験を行った。

4.2 実験条件

本実験では RE の移動方向を 3 条件（上昇、下降、停止）、VE の移動方向を 1 条件（上昇）の計 3 条件を設定した。これは、実験 1 において RE と VE の移動方向が矛盾する条件によって多くの被験者が移動方向の回答に関して混乱したためである。

4.3 実験手順

実験 1 と同様に、実験者および被験者はエレベータに乗った。被験者は実験者から実験の内容についての説明を受

表 2 実験結果（実験 2：移動感覚方向）

		VE											
		1 セット目			2 セット目			3 セット目			全体		
回答方向		上昇	下降	停止	上昇	下降	停止	上昇	下降	停止	上昇	下降	停止
RE	上昇	100%	0%	0%	83.3%	16.6%	0%	100%	0%	0%	94.4%	5.5%	0%
	下降	33.3%	66.6%	0%	33.3%	66.6%	0%	66.6%	33.3%	0%	44.4%	55.5%	0%
	停止	100%	0%	0%	100%	0%	0%	100%	0%	0%	100%	0%	0%

け、ヘッドマウントディスプレイとヘッドホンを着用した。エレベータのアナウンス音を遮蔽するため、実験中はヘッドホンからホワイトノイズが提示された。実験者は、まず被験者に基準刺激として RE 停止-VE 上昇条件を提示し、次に比較刺激として 3 条件のいずれかを提示した。そして、被験者は基準刺激に対する比較刺激の移動感覚強度を 7 段階リッカート尺度（1: 感じない-4: 基準刺激と同じ-7: とても大きい）で回答した。これを 1 試行とし、各条件を 1 試行ずつランダムに提示した。これを 1 セットとし計 3 セット、9 試行を行った。これにより前実験で見られた徐々に視覚的な手がかりに頼るようになる傾向の有無を検証した。また同時に被験者は比較刺激の移動感覚を感じた方向を上昇、下降、停止の 3 択で回答した。実験時間は被験者 1 名あたり約 5 分であった。被験者は 22 から 24 歳の男性 6 名であり、うち 2 名は実験 1 に参加した被験者である。

4.4 実験結果・考察

4.4.1 移動方向の回答

表 2 に本実験での全条件に対する被験者の回答方向の割合を示す。RE と VE の移動方向が同じ場合（RE 上昇-VE 上昇条件）、その方向（上昇）の回答率はほぼ 100%であった。これは実験 1 で生じていた混乱が本実験では減少したことを示唆している。

表 2 中の黄色で示した条件に関して、RE と VE の移動方向が反対である場合（RE 下降-VE 上昇条件）、1 セット目および 2 セット目に関して RE の移動方向（下降）を回答する割合が大きかった一方で、3 セット目では VE の移動方向（上昇）を回答する割合が大きくなった。これは我々が予想したとおり、被験者は徐々に視覚的な手がかりに頼るようになり、エレベータの移動方向を錯誤しやすくなったためと考えられる。

4.4.2 移動感覚強度

図 5 に本実験での全条件に対する被験者の移動感覚強度を示す。RE と VE の移動方向が同じ場合（RE 上昇-VE 上昇条件）に移動感覚強度が大きく評価される傾向があった。これは先行研究[15][16]と同様の傾向であった。一方で RE と VE の移動方向が反対である場合（RE 下降-VE 上昇条件）も同様に移動強度が大きく評価される傾向があっ

た。本結果より、視覚提示のみによる移動感覚よりも、エレベータの移動が伴う場合の方が移動感覚強度は大きくなることが明らかとなった。

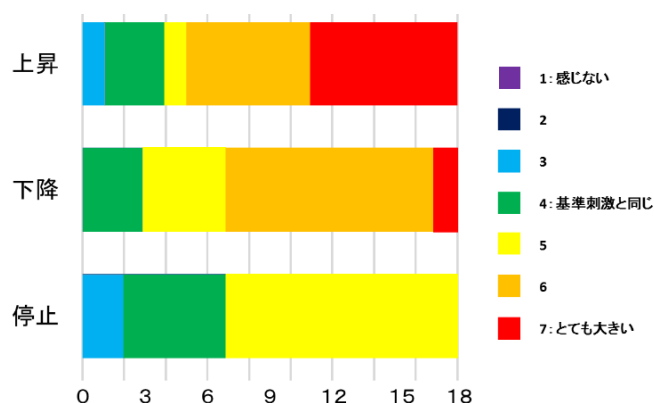


図 5 実験結果（実験 2：移動感覚強度）

5. アプリケーション

本章では、実験で用いたシステムと同様のシステム（加速度センサ、マイクロコントローラ、PC (Unity), HMD）を用いた、エレベータを用いたモーションプラットフォームのアプリケーションの例を示す。

5.1 無限上昇による宇宙への旅

図 6 に示すように、視覚による移動感提示によるエレベータの移動方向錯誤を利用して、無限に上昇するエレベータに乗って宇宙旅行する体験を提供するアプリケーションを作成した。本アプリケーションでは、ユーザの乗った RE は上昇と下降を繰り返す（例：1 階-2 階-1 階-2 階...）。一方で図 6 に示すように HMD は地上からひたすら上昇していく VE の映像（地表-成層圏-宇宙空間）を一人称視点でユーザに提示する。このとき、エレベータの変位は式(1)を用いてシミュレーションした。ただし、RE が上昇する場合は $k=1$ ，下降する場合は $k=-1$ とした。

本アプリケーションの制約の一つに RE が上昇、下降し終える度に VE も停止する必要がある点が挙げられる。解決策として、式(1)を次式のように改変することが考えられる。

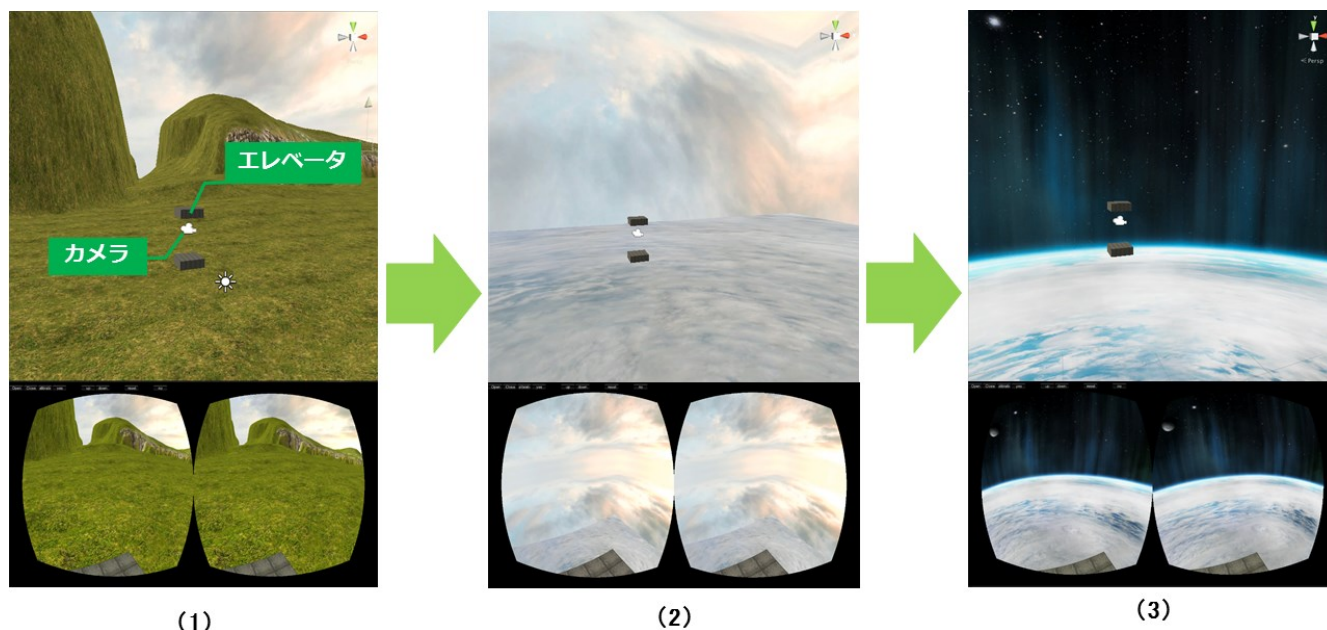


図 6 VEの様子。俯瞰視点（上図），体験者視点（下図），
(1) 地表，(2) 成層圏，(3) 宇宙空間

$$v = |a|t + v_0$$

$$y = \frac{1}{2}|a|t^2 + vt + y_0 \quad (2)$$

変位 y は加速度の絶対値によってシミュレーションされる。つまり、VE は減速することなく加速し続けられる。ただし、RE と VE それぞれが提示する移動感覚強度の差異が大きくなると、体性・前庭感覚と視覚の不一致によって酔いが生じたり、コンテンツのリアリティが低減したりすることが予想される。したがって、体性・前庭感覚と視覚の移動感覚強度の不一致がどの程度許容されるかを検証する必要がある。

6. おわりに

本研究では新たなモーションプラットフォームとしてエレベータに着目した。エレベータの設置台数は非常に多く、至る所で利用できる。本稿ではエレベータをモーションプラットフォームとして利用する際の制約のひとつである有限な可動範囲に対し、ベクションを用いることでエレベータによる移動感覚強度保ちつつ、ユーザに移動方向のみを錯誤させることで解決を試みた。被験者実験の結果、エレベータの移動方向と反対方向に移動する視覚刺激を提示することでエレベータの移動方向を錯誤させることが可能であることが示唆された。また錯誤が生じる条件での移動感覚強度についても検証し、視覚刺激のみで錯誤させるときよりも強い移動感覚が生起することが明らかとなった。

さらに本現象を用いたアプリケーションとして無限上昇

するエレベータによる宇宙旅行体験を提供するコンテンツを作成した。エレベータは上昇・下降を繰り返す一方で、視覚刺激による移動感覚錯誤により常に上昇方向への移動感覚を提示し、無限上昇するように感じられるエレベータを実現した。

今後は製作したアプリケーションの評価を行うとともに新たなアプリケーション（無限下降による深海探査など）を製作する予定である。また体性・前庭感覚と視覚における移動感覚強度の差異が移動感覚に与える影響に関して検証する。

参考文献

- [1] Vertical Motion Simulator ,NASA:
<http://www.aviationsystems.arc.nasa.gov/facilities/vms/index.shtml>
- [2] Driving Simulator, TOYOTA: http://www.toyota-global.com/innovation/safety_technology/safety_measurements/driving_simulator.html
- [3] L.P. Cheng, P. Lühne, P. Lopes, C. Sterz and P. Baudisch : Haptic Turk: a Motion Platform Based on People, Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 3463-3472, (2014)
- [4] 日本エレベータ FAQ, <http://www.n-elekyo.or.jp/contact/index.html>
- [5] M. H. Fischer and A. E. Kornmüller : Optokinetic ausgeloste Bewegungswahrnehmungen und optokinetischer Nystagmus. Journal of Psychological Neurology, 41, 273-308. (1930)
- [6] J.R. Lishman, D.N. Lee: The autonomy of visual kinaesthesia, Perception, vol.2, p.287-294, (1973)
- [7] T. Nojima, Y. Saiga, Y. Okano, Y. Hashimoto and H. Kajimoto, The Peripheral Display for Augmented Reality of Self-Motion, proceedings of 17th International Conference on Artificial Reality and Telexistence, (2007)
- [8] H. Yoshikawa, T. Hachisu, S. Fukushima, M. Furukawa, H.

- Kajimoto and T. Nojima : Studies of Vection Field II: a method for generating smooth motion pattern, proceedings of Advanced Visual Interfaces, Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces(AVI12), pp. 705-708, (2012)
- [9] Ars Electronica Elevator,
http://www.theowatson.com/site_docs/work.php?id=19
- [10] So Real it's Scary, LG Electronics,
<http://www.youtube.com/watch?v=NeXMxuNNIE8&hd=1>
- [11] 久米祐一郎, 長谷川大 : 鉛直方向加速度と視覚情報の移動感覚へ与える影響, 映像情報メディア学会誌 : 映像情報メディア 58(5), 727-730, (2004)
- [12] A.J.Gundry : Thresholds of Perception for Periodic Linear Motion, Aviat. Space Environ. Med., 49, pp.679-686 (1978)
- [13] I.P. Howard and L. Childerson : The Contribution of Motion the Visual Frame and Visual Polarity to Sensations of Body Tilt, Perception, 22, pp.753-762 (1994)
- [14] G. Melvill Jones and L.R. Young : Subjective Detection of Vertical Acceleration : A Velocity-Dependent Response?, Acta Otolaryngol, 85, pp.45-53, (1978)
- [15] M. Edwards, S. O'Mahony, M. R. Ibbotson and S.Kohlhagen : Vestibular stimulation affects opticflow sensitivity, Perception, Vol. 39, No. 10, pp.1303-1310, (2010).
- [16] L. R. Harris, M. Jenkin and D.C. Zikowitz : Vestibular cues and virtual environments : choosing the magnitude of the vestibular cue ; IEEE Vistual Reality Conference, pp.229-236 (1999).