

ゆりかも目：2台の360°カメラによるレール上浮遊体験

勝又 航生¹ 坂井 俊介¹ 星 貴之² 稲見 昌彦²

概要：本稿ではレール上を浮遊するという非日常的な体験を生成する方法について提案する。具体的には、移動車両の進行方向の前方と後方に配置した2台の360°カメラによって撮影された映像を、つなぎ合わせる。本稿では撮影に適した列車として「ゆりかもめ東京臨海新交通臨海線」を対象として提案手法を実装し、HMDを通してレール上を浮遊する体験を実現した。加えて、詳細な方法及び今後の課題について述べる。

YurikamoMe: Floating Experience above Railways by two 360-degree Cameras

KATSUMATA KOKI¹ SAKAI SHUNSUKE¹ HOSHI TAKAYUKI² INAMI MASAHIKO²

Abstract: This paper proposes a method to create an extraordinary experience, floating above railways. Two 360-degree cameras were attached on the front and back of a moving vehicle, and the filmed images by these cameras were combined to form a 360-degree outside scene. In this paper, we chose a new transit system Yurikamome as a target vehicle to implement our method so that we created the floating experience. The details of this method and future work are discussed.

1. はじめに

360°動画は、視聴者が視点を上下左右 360°さまざまな画角に向けて対象物を見ることが出来る動画コンテンツであり、表示範囲が動的に変化することにより高い没入感を得ることができる。近年、対応するデバイスやソフトウェアの発達によって、360°動画を一般のユーザが簡単に作成、視聴することができるようになってきている。360°動画を作成し視聴するためには、360°映像を撮影する機材、撮影した素材を360°動画として編集するためのソフトウェア、作成された360°動画を視聴するためのビューワーが必要である。360°動画の撮影に関しては、360°映像の撮影に特化した小型カメラである RICOH 社の Theta シリーズ [1] の発売などを受け、比較的安価かつ簡単に360°映像を撮影することが可能になっている。

360°動画をはじめとした 360°コンテンツの開発に関しては、無料で提供されているゲーム開発エンジンである Unity[2] や、Google 社が無料でインターネット上で提供している VR 開発用 SDK[3] といったオープンソースソフトウェアを利用することで、多くの人々が開発することが出来るようになってきている。さらに360°コンテンツの視聴環境としては、360°動画を始めとする VR 体験に特化したヘッドマウントディスプレイ (HMD) だけでなく、Google Cardboard[4]、ハコスコ [5] のように加速度センサが搭載されたスマートフォンを利用したビューワーが登場している。

動画コンテンツとして、列車内から撮影された映像が多く動画として投稿されている。列車の線路上は通常立ち入ることができないため、列車内から景色を撮影することが多い。列車に乗り上げた上で列車の通る地点からの360°映像を撮影することを考えると、列車の構造上、進行方向の列車外部の景色と、進行方向逆向きの景色とを1台のカメラで同時に撮影することは出来ない。そこで我々は2台のカメラを用い映像を合成することによって列車内か

¹ 東京大学 大学院情報理工学系研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
The University of Tokyo

² 東京大学 先端科学技術研究センター
Research Center for Advanced Science and Technology, The
University of Tokyo

らの映像体験の拡張を試みる。列車はレール上を走行するため、先頭部と最後尾が必ず同じ軌跡を走行することになる。すなわち、先頭部と最後尾のレール中央部の同じ高さの点は、時間差で全く同じ点を通る（ただし始点終点周辺の一部分を除く）ことが言える。したがってそれぞれの点にカメラを設置することができれば、先頭部では進行方向の180°の視界を、最後尾では進行方向逆向きの180°の視界を撮影し、この2つを合成して新しい360°映像を作成することが出来る。この2つの180°の視界は360°カメラを用いて簡単に撮影することが可能である。2つのカメラが同じ地点を通るタイミングには時間差が生じる点に注意して映像の合成を行う必要がある。

したがって我々は、先頭部と最後尾のレール中央部の同じ高さに360°カメラを設置して動画を撮影し、レール上のある地点を通るときの先頭部のカメラの360°映像の1フレームの、進行方向を向いた180°の半球画像部分と、最後尾のカメラが時間差で先頭部と同じ地点を通る際の360°映像の1フレームの、進行方向逆向きの180°の半球画像部分とを用いて、360°画像を合成しそれを動画に再構成して360°映像を構築する手法を提案する。これにより2台の360°カメラを用いて撮影した映像の合成という簡単な手法でレール上を走行する体験の出来る映像が作成可能である。

本手法を用いて実際に360°映像を作成することを考える。多くの列車には運転席のスペースに立ち入れなかったり窓枠の制限により先頭部に360°カメラを設置して180°の視界を確保することが難しい。そこでこうした車体の物理的な制限による影響を極力少なくするために、我々はより広い視界を確保できる車両として、ゆりかもめ東京臨海新交通臨海線に注目する。ゆりかもめは全自動運転であるため運転席部が存在せず、先頭部及び最後尾部の中央部が突き出した曲面ガラスを通して進行方向のパノラマ撮影が可能である。そのため360°カメラを設置することで簡単に180°の景色を撮影することが可能である。

本稿では、ゆりかもめの前面の窓と後面の窓にそれぞれ設置した2台の360°カメラによって撮影した二つの全天球映像の画像列から、前方部の進行方向の半球面と後方部の進行方向逆向きに存在する半球面をつなぎ合わせることで、窓枠及び車内に当たる部分を画像から取り除いた全天球画像を作成し、この全天球画像を1フレームとして動画に再構成しレール上を移動する360°動画「ゆりかもめ」を作成する。

2. 関連研究

2.1 360°動画コンテンツ

ハコスコスタア [5] には一般ユーザが作成した360°動画コンテンツがアップロードされており、360°動画を視聴するためのビューワーを通してサイト内でコンテンツを体

験することができる。作成した360°コンテンツの配布を容易にしている。ユーザが360°映像内を撮影された時間方向に移動しながら体験することが出来るコンテンツの例として、数百mの高度までのジャンプ移動を体感できるVR Jump Tour[6]がある。予め撮影した特定の地点の地上から上空までのあらゆる高さの360°映像を用い、ユーザのジャンプの動きに合わせて映像を提示することで、大ジャンプをしているかのような体験を生成している。一方、360°映像を空間内で自由に移動できるコンテンツとして、日本列島VR[7]がある。基盤地図情報をもとに三次元CG空間に再現された日本列島の上空を移動しながら360°の景色を見ることが出来る。

2.2 画像処理による拡張

別々の位置または方向を向いた複数台のカメラによる映像を合成して3人称視点での映像を作成する手法として、複数台の車載カメラを用いたMulti Angle Vision[8]がある。これは車のドライバーの視界補助として、上空から車を見下ろしたマルチアングルビューをドライバーに提供するものである。車の前後左右に4つの魚眼カメラを設置し、撮影された映像をリアルタイムに合成し、CG表示された自車の周囲の俯瞰映像を作り出している。

2.3 車体の除去

車体内部をディスプレイにすることで、車体外部に設置したカメラの映像を表示して擬似的に内部から見た車体を透明化する手法が考えられる。飛行機の機体内部に適用しようとするプロジェクト [10] も存在しているが、車体自体の構造の変更が必要である。また、車体を除去した映像の構築のためAR技術を用い、車体外部のカメラの映像を車体部分に投影する方法がある。実際に車のドライバーに頭部搭載型プロジェクタ (HMP) を装着し、再帰性投影技術 (RPT) を用いて車の死角領域を透視表示する視野外情報を提示する試みが行われている [11]。これは透視映像を見ることが出来るのがドライバーのみで、かつリアルタイムに限定されてしまうため、多くの人が時間的な制約を受けずに視聴できるように配布可能な360°映像を構築を目指す本稿の目的とは異なる。

2.4 列車から撮影された動画体験

列車内から撮影された動画コンテンツは多く存在する。ゆりかもめをテーマにした映像コンテンツとして、Tokyo Sky Drive[12]が挙げられる。夜間に撮影したゆりかもめ前面の窓からの映像を用い、水平線を挟んで上側を垂直反転させた映像を下側に配置し、レールや地上部が消失しており、あたかも建物の合間を浮遊して移動するような体験が生成されている。

表 1 ゆりかもめの映像生成フロー.

Table 1 Proposed system in series of methods.

1. ゆりかもめの前方・後方映像の撮影
2. 前方・後方映像を合成
3. 360°映像として再構成

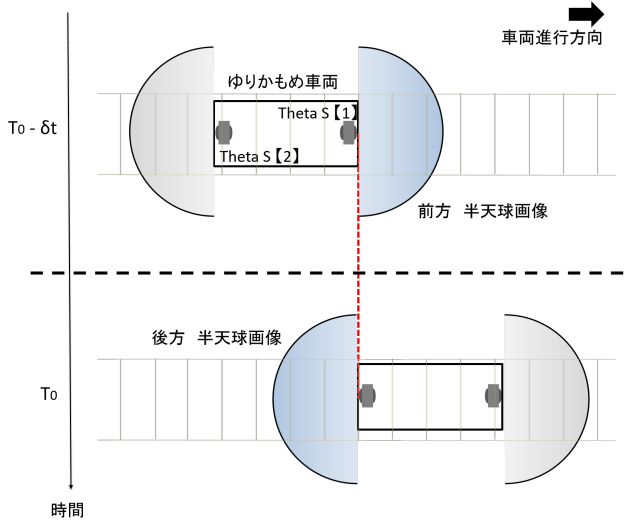


図 1 提案手法システムの原理図：前面の窓から得られる半球画像と後面の窓から得られる半球画像を繋ぎ合わせることで目的の全天球画像を構成する。

Fig. 1 Principle drawing of proposed system: Omnidirectional image is rebuilt by patching the two half celestial sphere images taken from front/back of the moving vehicle.

我々はこれらの関連研究を踏まえ、新たなエンターテイメント作品として一般人が手軽に作れて利用可能な 360°コンテンツの撮影・編集方法の実現を目指す。

3. 提案手法

3.1 概要

図 1 に本手法の原理図を掲載する。360°動画を撮影するが、これをフレームごとに分解して処理を行う。ある地点における全天球画像を得るため、レール上を走る列車の前面の窓に設置した 360°カメラから撮影される進行方向の半球画像と、後面の窓に設置した 360°カメラから撮影される進行方向逆向きの半球画像とを、つなぎ合わせる。レール上を走る列車において先頭部のレール中央部に設置したカメラと最後尾のレール中央部に設置したカメラはどちらも、始点と終点周辺を除いたレール上の同じ位置を、時間差はあるものの必ず通過するため、理論上レール上のほとんどすべての位置において全天球画像を構成することが出来る。

前述の処理を通してレール上の全ての点における全天球画像を作成し、それらを時系列的につなげることでゆりかもめのレール上を移動する 360°映像を作成した。

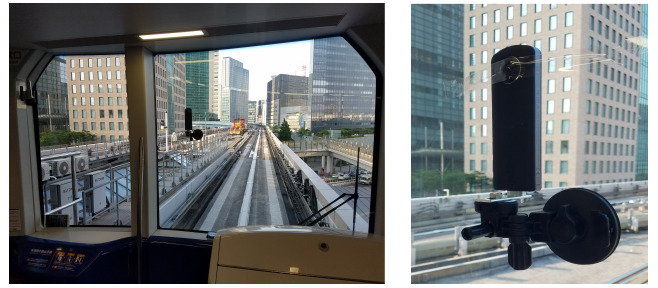


図 2 撮影時の様子：カメラホルダーを窓に吸盤で固定し、カメラ本体はテープによって窓と固定している。

Fig. 2 Camera on a suction pad fixed to the window is fixed to the window by scotch tape.

3.2 撮影

吸盤付きのカメラホルダーを用い 360°カメラを設置し、振動の影響を抑えるためテープによってカメラ上部を窓に強く固定した。大きな振動が入ると視界が振動する他、また、前面の窓に設置したカメラと後面の窓に設置したカメラが同じ座標を通るようにしっかりと計測して設置する必要がある。今回の撮影では、人間の目線と同じような高さにレンズを設置し、窓から普段見ている光景から全天球画像を構成するようにした。窓にレンズを接地して撮影すると反射による映り込みが見られるため、レンズの周辺に手をついたり、目立つものを置かないことに留意する必要がある。使用したカメラは RICOH 社の THETA S で、30 fps で撮影した。これは比較的安価で軽量なため、一般的に手に入りやすかつ撮影に適した 360°カメラである。

3.3 映像編集

3.3.1 前方・後方画像の組み合わせ生成

前方の半球画像と後方の半球画像をつなぎ合わせて全天球画像を作成する方法について述べる。両画像を画像列に変換し、図 1 のように前方と後方のカメラが同じ地点の画像の組み合わせをつなぎ合わせる必要があった。

等速運動で車両が移動している区間においては、前方と後方画像の組み合わせを一つ見つけることができれば、以降一つずつフレームをずらすことで、適当な組み合わせが成立する。最初の組み合わせを検出する手法として、マッチング点の検出による画像列探索が方法として考えられるが今回は目視によって定めた。

3.3.2 前方・後方のつなぎ合わせ

適切な組み合わせの前方・後方半球画像のつなぎ合わせを画像処理ライブラリ OpenCV を利用して行った。セパレート画像をパノラマ画像に変換したのち、窓枠を境界として車外の領域を残すようにマスク処理を行い、前方・後方画像を合成した。結果、図 3 のように窓枠によって境界領域に映らない部分が発生した。

空白領域の処理には前後フレームに映っている領域による補間や画像補間アルゴリズムによる補間が考えられる



図 3 前方・後方画像の車外領域を合成した結果.

Fig. 3 Simple composition of front/back window scenery.

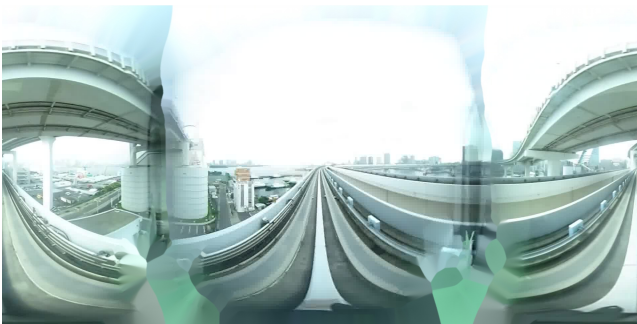


図 4 マスク処理によって生じた空白領域に補間を行った結果.

Fig. 4 Result of inpainting the blank area caused by masking.

が、本報では OpenCV の既存ライブラリによって簡単に使える `inpaint` 関数 (Alexandra Telea 法) を利用した.

得られた図 4 と同様の処理を全ての前後部のカメラからの半球画像の組み合わせに施し、画像列を動画に変換することで目的の全天球動画を得た. これをハコスストアにアップロードすることで、360°動画として見る事が出来る.

4. 考察

4.1 測定誤差

カメラの撮影 フレームレートを k [fps], 移動車両の速度を v [km/h] とすると 1 フレーム毎に車両が進む距離は $\frac{v \times 10^4 / 3600}{k}$ [m/frame] として表せる. 従って、カメラのフレームレートによって生じる前方画像と後方画像のズレの誤差は最大で $\frac{v \times 10^4 / 3600}{2k}$ [m/frame]. 本稿で行った撮影の場合、ゆりかもめの最高速度が約 16.7[m/s], カメラのフレームレートが 30[fps] であったため誤差は 25[cm] 以内である. これは今回作成した動画内においてはほとんど知覚されない.

4.2 移動物体の消失

ゆりかもめの全長がおよそ 51[m] であり、時速 60[km] での走行時は前方部と後方部が同じ位置を通過する時間差は 3.1[s] になる. このように生成される全天球画像の前方の半球画像と後方の半球画像が撮影されたタイミング

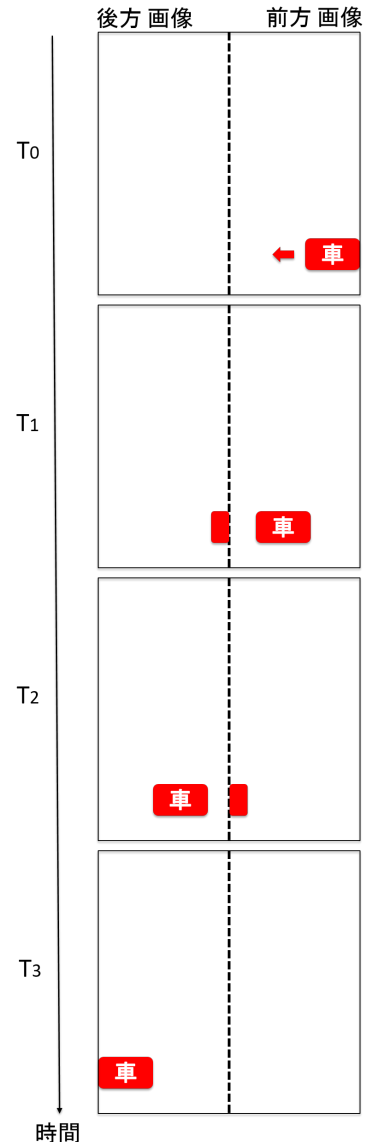


図 5 移動物体に起きる現象の概略図.

Fig. 5 Image of what occurs in moving objects.

には時間差が生じるので、その時間差の間に前方と後方の境界線を越えるような動きをする移動物体は物理的法則を無視した動きをする. ユーザには、境界線を通過する移動物体は一方の半球画像から一度消失しその後数秒してから現れるような映像として観測される. これは現状の実装では取り除くことができない.

4.3 生成された体験

ゆりかもめでは、前項で述べた通りゆりかもめの等速運動部分、具体的には芝浦ふ頭駅を出発してからレインボーブリッジを渡るまでの部分のレール上を移動する 360°動画を作成した. これにより車両の床が消失したレール上の一点から、ユーザがあたかもレール上を浮遊して移動するよう感じられる体験を実現した.

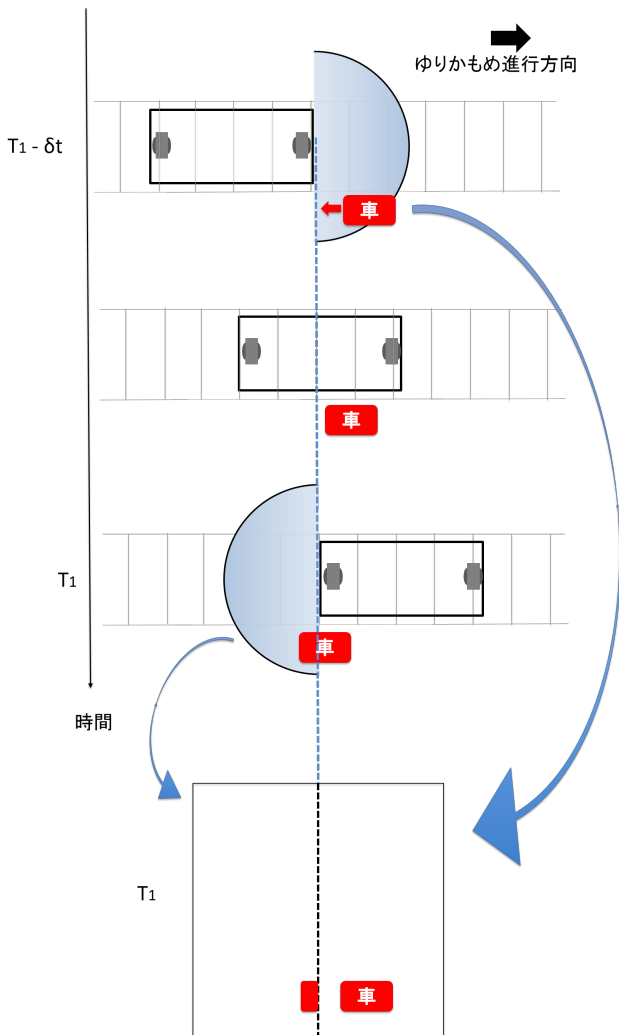


図 6 移動物体に起きる現象の原理図。図 5 における $t=T_1$ の生成図。前方の半球画像と後方の半球画像の撮影時の時間差が原因で、合成画像同士の間で車の位置が移動してしまっている。

Fig. 6 Principle of vanishing moving objects. The time lag between the two half celestial sphere images causes the moving object's mismatch when rebuilt into a Omnidirectional image.



図 7 前後の半球画像の境界線を越える移動物体は消える。

Fig. 7 Moving objects crossing the border of the two half celestial sphere images disappears.

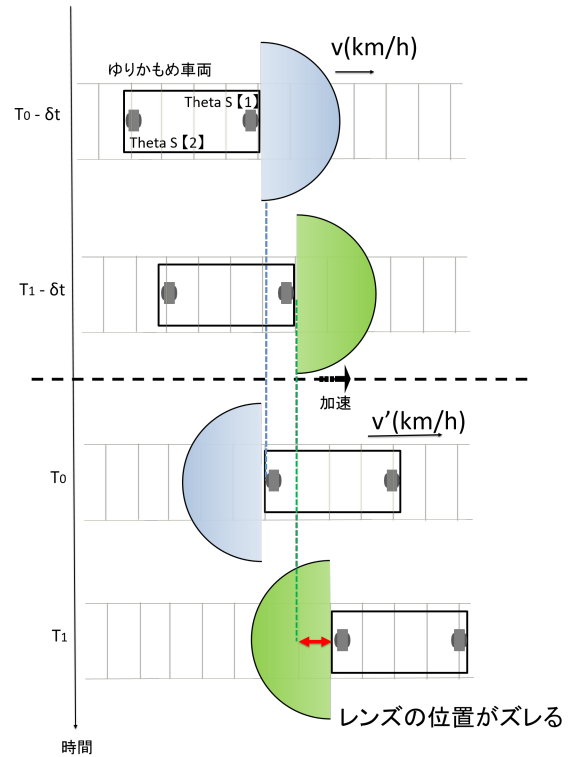


図 8 車両加速時に生じるフレーム毎の移動距離の差。

Fig. 8 The difference in travel distance of respective frames, while acceleration.

5. 今後の展望

5.1 車両の加減速への対応

等速運動時は先頭部と最後尾のフレームの対応をもとに動画を作成することができたが、加速度運動を行っている部分では本手法はそのまま適用することができなかった。先頭車両と後方車両の加減速を行う場所は異なるため、前方と後方画像のフレーム毎の移動距離に差が生じ、一つずつフレームをずらして組み合わせを生成すると徐々に差が大きくなっていく。この問題に対処するためには、各フレーム中の車両の移動速度の比率によって補正を行う必要がある。すなわち移動速度によって各フレーム毎の移動距離を求め、前後の半球面フレームの適切な組み合わせを割り出す。

各フレームにおいて前後の画像列のオプティカルフローを求めることで各フレーム撮影時の車両の速度を相対的に求めることができる。セパレート映像のオプティカルフローの長さはレンズと物体の距離や魚眼レンズによる変換に強く影響を受けるため、二つのフレームのオプティカルフローの大きさを比較する際はレンズから同じ距離にあるものに注目しなければならない。

基準となるフレームの進行速度と、それぞれのフレームの進行速度の比率が求まったら、その比率に従って組み合わせるフレームを間引いたり足したりすることで適切な前後画像の組み合わせを生成するこの手法を実装すること

で、ゆりかもめが加速度運動を行った区間への応用が可能である。

5.2 インタラクシオン性の付与

本稿での実装においては、ユーザは生成された360°動画内において見る方向を変化させることは出来るが、レール上の移動速度は撮影時のゆりかもめの速度と一致している。前述したVR Jump Tour[6]においては、ユーザが実際にジャンプすることでその加速度を用いてVR空間内でジャンプする体験を与えており、これはユーザが撮影動画を時間方向に移動することが出来ることを意味している。ゆりかもめ目においては、レール上の移動速度をユーザが調整できるようにすることで、現実のゆりかもめの移動速度に拘束されないより自由な移動体験が可能になると考えられる。そのためにはユーザの動きとゆりかもめの移動速度とを対応させる必要がある。ある時点におけるゆりかもめの速度は、フレームごとの360°画像を比較してオプティカルフローを用いることで算出されうる。一方で対応するユーザの動きについては、本手法の主眼がスマートフォン等を利用して簡単に体験可能な映像コンテンツの生成にある点から、スマートフォンでセンシング可能かつユーザが360°を見渡す動きと干渉しないようなユーザの動作を用いる必要がある。今後追加実装が必要である。

5.3 撮影機材の簡素化

本稿の撮影では2台の360°カメラを用いて、前面と後面の窓から同時に撮影を行ったが、1台の360°カメラを利用して別の車両からの撮影を二度行うことで実現は可能である。この場合、最初に撮影したレールと同一のレールを走り、レンズの位置に注意して同じ位置を通るようにしてもう一方の窓からの撮影をすれば同じような映像を得ることが出来る。ただし、前方の半球画像と後方の半球画像の時間差が、同一の電車で撮影するときより大きくなってしまふことから、天気のような変動ししやすい車外環境の影響が大きくなることが予想される。

5.4 ゆりかもめ以外の車両への応用

本稿で提案した手法の実装にあたりゆりかもめを題材としたのは、列車の先頭部および最後尾においてレールの中央にくるように窓に設置したカメラから180°の視界を確保可能であったからである。本手法は、前方部と後方の2つのカメラが同じ位置を時間差で通過する保証がある車両、すなわちそれぞれの車両の中心線上に同じ高さのカメラを設置可能な場合において、具体的にはロープウェイなどに適用が可能である。車両の物理的制限によりカメラが180°の視界を確保できない場合は、車両の左右に全天球カメラを貼り付け、90°ごとの視界4つを合成するといった応用手法が考えられる。ただしこの場合4つのカ

メラが同じ軌跡を通るわけではないため、4つのカメラの物理的距離等を勘案して画像の合成を行う必要があり、本稿の提案手法の特徴である実装の簡単さが失われてしまうという欠点が存在する。

6. 結論

本稿では、移動車両の前面と後面の窓を通して見られる360°カメラの映像を繋ぎ合わせることによって浮遊体験を生成する一般的な手法について議論し、具体的にはゆりかもめのレール上を移動する体験が可能な360°動画を試作した。本手法の特徴は、安価に手に入る360°カメラを用いることで容易にレール上を移動するVR体験コンテンツを作成できる点にあり、これによりレール上という通常立ち入ることのできない場所における浮遊体験を実現した。今後の展望として、等速度運動部分だけでなく加速度運動部分においても速度差を考慮した実装を行うことで体験可能な領域の拡張、さらにレール上の移動をユーザが制御するインタラクシオンコンテンツへの発展が考えられる。

謝辞 東京大学情報理工学系研究科廣瀬・谷川・鳴海研究室の方々、特に青木大樹氏及び松本啓吾氏は映像処理の際にマスク処理を行う具体的な手法について提案をいただいた。感謝の意を表し、ここに記す。

参考文献

- [1] RICOH THETA S <https://theta360.com/ja/>
- [2] Unity <http://japan.unity3d.com/>
- [3] Google VR SDK for Unity <https://developers.google.com/vr/unity/>
- [4] Google CardBoard <https://vr.google.com/cardboard/>
- [5] ハコスストア <https://store.hacosco.com/>
- [6] VR Jump Tour <https://hacosco.com/app/vr-jump/>
- [7] 日本列島 VR <http://www.jpnr.com/>
- [8] 清水誠也, et al. "ドライバーの視界補助を行なう Multi Angle Vision システム." 富士通テン技報 28.2 (2010): 12-18.
- [9] IXION Windowless Jet Concept <https://vimeo.com/78458486>
- [10] 吉田匠, et al. "バーチャルリアリティ技術 見回し動作に対応した再帰性投影技術による乗り物の視野外情報提示." The Journal of The Institute of Image Information and Television Engineers 63.6 (2009): 801-809.
- [11] Tokyo Sky Drive <https://www.youtube.com/watch?v=W6kEfDrb3l4>