

# 手描き絵から生成したCG空間内での移動と インタラクションを実現する 「不思議なスケッチブック・ザ・ライド」の開発

朝倉 麻友<sup>1</sup> 水野 慎士<sup>1</sup>

**概要:** 本研究では、手描きの絵から三次元CG空間を生成して、さらに生成した三次元CG空間内にまるで没入したような感覚で、実際のカートを使って自由に移動することができるインタラクティブコンテンツ「不思議なスケッチブック・ザ・ライド」の実装を行った。三次元CG空間には建物や木の絵に基づいて三次元CGの街が構築されている。そして、ディスプレイ付きカートに乗って、構築された三次元CGの街を実際に運転しながら移動することができる。カートの動きとディスプレイ映像の三次元CG内の移動は連動しており、ユーザは自分の絵から生成された三次元CGの街の中に没入して、カートを使って三次元CGの街を自由に移動することができる。そして、三次元CGの街の建物をカートで壊すなど、三次元CG空間中のオブジェクトとのカートを介したインタラクションといった、これまでになかった体験を実現している。

## 1. はじめに

子供が多く参加するイベントやエンタテインメント施設では、参加者自身が創作活動を行いながらコンテンツに積極的に関わる体験型デジタルコンテンツの人気が高まっている。例えば、チームラボによる「お絵かき水族館」[1]では、参加者が海洋生物の塗り絵を行い、塗り絵から生成されたCGモデルをCG水族館で泳がせることで、参加者みんなでCG水族館の生物を充実させていく。また、リトルプラネットによる「SKETCH RACING」[2]では、参加者が塗り絵によって車の三次元CGモデルを作成して、参加者同士がそれぞれ作成した車でレースを競い合う。

そして、著者らも同様のコンセプトを持つデジタルコンテンツをいくつも開発してきた。例えば、「お絵描きダンスステージ」[3]は、参加者がお絵描きとダンスを行うことでダンスするCGキャラクターを作成して、参加者みんなでCGダンスステージで踊るCGキャラクターで充実させていくコンテンツであり、「Toyota City Creation」[4]は、参加者が車の絵を描くことで街の中を走る車を増やしていくコンテンツである。

参加者自身が創作活動を行いながらコンテンツ自体を作り上げていくことは、全体的な体験時間が長くなったりコンテンツの内容に直接関わることであったりするため、参

加者の満足度が高くなることが期待できる。そして、コンテンツの一部の内容が毎回変わるため陳腐化しにくいといったメリットもある。

このような背景の中、著者らはユーザが創作活動によってコンテンツ内容に積極的に関わることができ、コンテンツ体験時にはユーザ自身の創作作品に没入することができるデジタルコンテンツ「らくがきクルーズ」を開発した[5]。このコンテンツでは、お絵描きで三次元CGの街を構築してから、ディスプレイ付きカートに乗って自分で構築した街の中を移動することができる。しかし、移動ルートは予め決まったコースに限られており、ユーザとのインタラクションは実現されていなかった。

そこで、本研究では「らくがきクルーズ」を改良することで、ユーザのお絵描きから構築された三次元CGの街を実際にカートに乗って仮想的に移動することができるインタラクティブコンテンツ「不思議なスケッチブック・ザ・ライド」の開発を行った。このコンテンツでは、ユーザ自身がディスプレイ付きカートを自由に運転する。このとき、センサを用いてカートの位置と方向を取得して、カートのディスプレイに表示する三次元CGの視点位置と視線方向にリアルタイムで反映させる。これにより、ユーザは実際のカートを運転することでお絵描きから生成された三次元CGの街に没入して自由に移動することが可能となる。そして、三次元CGの街の建物や車と衝突してカートで壊し

<sup>1</sup> 愛知工業大学大学院経営情報科学研究科

たり、それに対してカートが振動したりするなど、三次元 CG 空間中のオブジェクトとのカートを介したインタラクションといった、これまでにないインタラクティブ体験を実現している。

## 2. 関連研究

カートなどの乗り物に乗って CG 空間に没入することができるコンテンツとしては、「らくがきクルーズ」と同じディスプレイ付きカートを用いた「ムーンライトクルーズ」[6] や、HMD を装着して VR 空間や AR 空間でゴーカートを実際に運転する「VR GO KARTS」[7]、「HADO KART」[8] が開発されている。しかし、これらのコンテンツにおいてユーザが没入できるのは、コンテンツ開発者によってあらかじめ用意された三次元 CG 空間だけである。

「マリオカートライブサーキット」は、コースや敵キャラクターが三次元 CG で合成された AR 空間内でカメラ付きリモコンカーを操作してレースを楽しむことができる [9]。ただし、三次元 CG はあらかじめ用意されたもので、ユーザが関与できるのは実空間への物体の配置やルートの設定となる。また、カートに実際に乗ることはできない。

「Quill」は HMD を装着した VR 空間内に没入しながら、体験者自身が三次元 CG を制作することができる [10]。ただし、制作には HMD とコントローラが必要な上、コントローラを使った三次元的描画の習得が必要なため、誰でも気軽に体験できるという訳ではない。

本研究の「不思議なスケッチブック・ザ・ライド」は、ユーザが没入するための三次元 CG 空間を自分自身で完成させていくという点で、従来コンテンツと比べて参加者のコンテンツ内容に対する関与が大きい。そして、単に自分の絵から生成された三次元 CG を俯瞰的に観察するだけでなく、その中に入り込んで、自分でカートを運転して自由に移動できるという、従来のコンテンツにはない特徴を持つ。そのため、体験者コンテンツに対する満足度も高くなることが期待される。

## 3. コンテンツについて

### 3.1 概要

本研究の「不思議なスケッチブック・ザ・ライド」は、2種類のお絵描きとカートへの乗車という2つの体験によって構成されている。図1にコンテンツ体験の概要を示す。

お絵描きに関する部分は従来の「らくがきクルーズ」と同じである。描くのは街と車の2種類で、どちらも紙にカラーペンで描く。街のお絵描きでは、ユーザは家、ビル、樹木、橋、看板、雲など、街の中で見かけそうなものを自由に描く。そして、描いた絵をカメラに差し出すと、描いた家や樹木などがそれぞれ三次元 CG モデル化されて、それらが配置された CG 都市が自動的に生成される。車のお絵描きでは、ユーザは車の側面と上面、または側面と前面



図1 「不思議なスケッチブック・ザ・ライド」の概要

を自由に描く。そして、描いた絵をカメラに差し出すと、車の三次元 CG モデルが自動的に生成されて、お絵描きによって生成された CG 都市を走り始める。

ユーザはディスプレイ付きカートに乗って運転することで、構築された三次元 CG 都市に没入したような感覚で移動することができる。カートは三次元 CG 都市内に仮想的に置かれた状態になっている。カート前方にはディスプレイが設置されており、三次元 CG 都市内に置かれた仮想カートの中から外を眺めたような CG 映像が表示される。そして、カートを運転して動かすと、三次元 CG 都市内の仮想カートも実空間のカートに同期して動き始めて、その結果としてカートに設置したディスプレイに表示された CG 映像も動き始める。そのため、ユーザは実際にカートを運転してその動きを体で感じながら、自分の絵から生成された三次元 CG の街をカートで移動するような体験をすることができる。

仮想カートは三次元 CG 都市内の建物や車との衝突判定を行い、実空間のカートに対するフィードバックを行う。例えば、実空間のカートの移動によって仮想カートが三次元 CG 都市内の建物に衝突したと判定すると、建物は破壊されてその様子はカート設置のディスプレイで確認することができる。また、音や振動も発生する。このように実空間のカート移動を介して、三次元 CG 都市内の建物との直接的なインタラクションも行うことができる。

### 3.2 全体のシステム構成

「不思議なスケッチブック・ザ・ライド」は、街 CG 生成システム、車 CG 生成システム、カート用 CG 映像 & フィードバックシステム、カート追跡システムから構築される (図2)。

街 CG 生成システムと車 CG 生成システムは「らくがきクルーズ」のものと同じである。それぞれ、「不思議なスケッチブック」[11] と「お絵描き i-Can」/「Toyota City

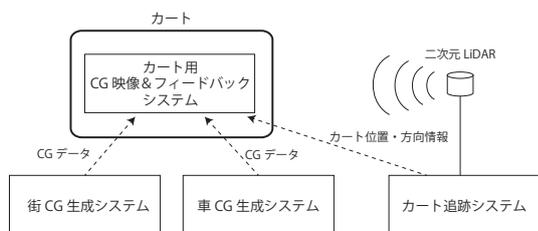


図 2 全体のシステム構成



図 3 使用した子供用乗用電動カート

Creation」[4] がベースとなっており、PC と Web カメラで構成されている。そして、カメラに街の絵や車の絵を差し出せば、それらの三次元 CG を自動的に生成する。どちらのシステムもカート用 CG 映像&フィードバックシステムに無線ネットワークで接続されており、それぞれ生成した街や車の CG モデルデータをカート用 CG 映像&フィードバックシステムに送信する。

カート用 CG 映像&フィードバックシステムは「らくがきクルーズ」の CG 都市構築システムとカート内部 CG 映像システムを合わせたものほぼ同じである。CG 生成システムから送信された街や車の CG モデルデータから三次元 CG 都市を構築して、三次元 CG 映像を生成する。カート用 CG 映像&フィードバックシステムは後述するカート追跡システムともネットワークで接続されており、カートの位置と方向に関する情報を常時受信している。そして、カートの位置と方向の情報に基づいて三次元 CG 都市内の仮想カートの位置と方向を決定して、仮想カートを視点とする三次元 CG 都市の CG 映像をリアルタイムで生成する。また、仮想カートと三次元 CG 都市内の各建物、車との位置関係を逐次確認して、衝突の有無を判定する。そして、衝突が発生したと判定した場合には、建物を破壊するなど映像によるフィードバックを発生させるだけでなく、音の発生や実空間のカートを振動など触覚的なフィードバックも行う。

カート追跡システムは、今回新たに追加されたシステムである。このシステムには二次元 LiDAR が接続されており、カートの位置と方向を取得して、カート用 CG 映像&フィードバックシステムに逐次送信している。

使用するカートは、子供用の乗用電動カートである(図 3)。全長 128cm、全幅 78cm、全高 76cm で、乗車定員は 1 名である。現状のシステムでは、カートのボンネット上にカート用 CG 映像&フィードバックシステムのノート PC を設置している。カートはカートに設置されているアクセルとハンドルで運転する他、リモートコントロールで運転することもできる。

## 4. カート追跡システムとカート位置の 3DCG 空間への反映

### 4.1 カート追跡システムの構成

「不思議なスケッチブック・ザ・ライド」では従来コン

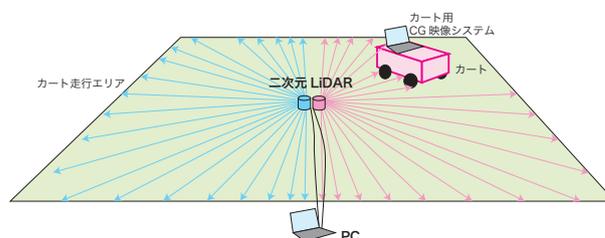


図 4 カート追跡システムの構成

テンツと異なり、カートはユーザの運転によって自由に移動する。お絵描きで生成した三次元 CG 都市をカートを運転して自由に移動するには、カートの位置と方向を逐次取得して、三次元 CG 都市内にある仮想カートの位置と方向に反映させる必要がある。

そこで、本研究で新たに追加したカート追跡システムは、自由に移動するカートの位置と方向をリアルタイムで取得する。図 4 にシステム構成を示す。

カートの位置の取得は二次元 LiDAR に基づいて行う。まず、二次元 LiDAR でカートが走行するエリアの床面をスキャンする。このとき、カートのタイヤ設置部分がスキャンされることになる。

### 4.2 追跡手法

まず、スキャンした結果を二値画像化する。走行エリア内にあるのはカートだけであり、ノイズ等の小領域の除去を行うことで二値画像ではカートのタイヤ部分だけが領域として抽出される。そして二値画像に適切な膨張処理を適用することで、2~4 つのタイヤ領域が抽出される。抽出できるタイヤ領域の個数は LiDAR に対するカートの方向によって変化するが、予備実験ではタイヤ領域が 1 つしか抽出できない状況は確認されなかった。

カートの位置と方向は抽出したタイヤ領域に基づいて決定する(図 5)。そのためには、各タイヤ領域がカートの左右前後のどのタイヤなのかをラベリングする必要がある。そこで、初期のラベリングは手動で行う。タイヤ領域が 2 つ以上抽出されている状態で、各領域に対して FL (左前), FR (右前), RL (左後), RR (右後) のいずれかのラベリングを行う。

ラベリングを行ったら、各タイヤ領域の重心座標に基づいて、4 つのタイヤの二次元座標  $p_{FL}$ ,  $p_{FR}$ ,  $p_{RL}$ ,  $p_{RR}$  を求める。ここで、前後のタイヤ間隔  $w$ , および左右のタイ

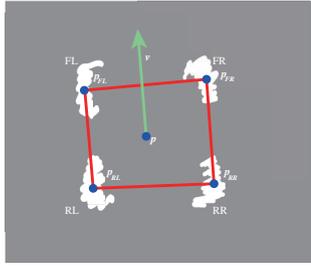


図 5 カートの位置と方向の決定

タイヤ間隔  $d$  は事前に測定可能であるため、2つのタイヤの座標が決まれば、残りのタイヤの座標は計算で求めることができる。例えば、前後の左側のタイヤ座標  $p_{FL}$  と  $p_{RL}$  が取得できれば、 $p_{FL} - p_{RL}$  を 90 度回転して正規化したベクトル  $t$  を求める。そして、前後の右側のタイヤ座標  $p_{FR}$  と  $p_{RR}$  は、以下の式で求めることができる。

$$p_{FR} = p_{FL} + wt \quad (1)$$

$$p_{RR} = p_{RL} + wt \quad (2)$$

前後右側、左右前側、左右後側のタイヤ座標が取得できた場合も、同様の考え方で残りのタイヤ座標を計算で得ることができる。

そして、手で初期のラベリングを行った後、以降のフレームにおける各タイヤ領域については、前フレームのタイヤ座標周辺を探索してタイヤ領域を関連付けることでラベリングを自動的に行う。カートの位置や方向によっては1つまたは2つのタイヤが他のタイヤによって隠れてしまい、タイヤ領域が抽出できない場合がある。このとき、該当するタイヤ座標の周辺を探索してもタイヤ領域が見つからないため、抽出されたタイヤ領域のラベリング結果に基づいて、前述の手法でタイヤ座標を計算で求める。探索領域をタイヤ座標周辺に限定することで、カート走行エリアに人が入った場合でも安定的なカートの追跡が可能である。

4つのタイヤの二次元座標  $p_{FL}$ ,  $p_{FR}$ ,  $p_{RL}$ ,  $p_{RR}$  が得られれば、カートの二次元座標  $p$  はタイヤ座標の平均値として以下の式で求める。

$$p = \frac{p_{FL} + p_{FR} + p_{RL} + p_{RR}}{4} \quad (3)$$

また、カートの方向ベクトル  $v$  は後方タイヤから前方タイヤへの方向ベクトルとして以下の式で求める。

$$v' = \frac{p_{FL} + p_{FR}}{2} - \frac{p_{RL} + p_{RR}}{2} \quad (4)$$

$$v = \frac{v'}{|v'|} \quad (5)$$

そして、カートの二次元座標  $p$  とカートの方向ベクトル  $v$  を逐次計算して、これらの値をネットワーク経由でカート用 CG 映像&フィードバックシステムに送信する。

#### 4.3 カート位置の 3DCG 空間への反映とフィードバック

カート用 CG 映像&フィードバックシステムでは、街



(a) カート走行エリア



(b) 2台の二次元 LiDAR



(c) お絵かきからの街 CG の生成



(d) 構築された三次元 CG 都市

図 6 実験の様子

CG 生成システムおよび車 CG 生成システムのデータを用いて構築した三次元 CG 都市内に仮想カートを配置する。そして、カート追跡システムから送られたカート位置情報を仮想カートに適用することで、実空間のカート移動によって三次元 CG 都市内を仮想カートで自由に移動することができる。

カート用 CG 映像&フィードバックシステムは、三次元 CG 都市内の建物や車と、仮想カートとの位置関係を常に把握している。そのため、それぞれで衝突判定を行うことで、仮想カートの移動に対して三次元 CG 都市内の建物や車をインタラクティブに反応させることができる。また、カートに振動モータを装着して、仮想カートが三次元 CG 都市内で建物や車と衝突したときに振動モータを稼働させることで、三次元 CG 都市内の衝突を実空間の体験者に対して触感としてフィードバックさせることも可能となる。

なお、現時点では仮想空間での衝突に対する実空間へのフィードバックは建物や車の破壊を表示する映像的なフィードバックだけを実装している。

## 5. システム実装と実験

### 5.1 実装

提案手法を検証するためにシステムを実装して実験を行った。図 6 に実験の様子を示す。

カートへの乗車は子供のみ可能であるため、今回はカートの運転はリモートコントロールで行った。カートの最高速度は約 3(km/h) である。

カートをスキャンするための二次元 LiDAR は北陽電機の UST-20LX-H01 (スキャンステップ角: 0.125 度, スキャン範囲: 20(m), フレームレート: 最大 40(fps)) を用いた。カートの走行するエリアは 500×500(cm) の正方形である。このサイズであれば 1 台の LiDAR でもスキャン可能であるが、実験ではより広い範囲への拡張も考慮して、2 台の LiDAR をエリア中央に設置して、それぞれエリアの半分ず

つをスキャンした。そして、2台のLiDARによるスキャン結果を統合して、500×500画素、つまり1画素あたり1(cm)の解像度で二値画像化した。

カート追跡システムのPCはカート走行エリア外に設置しており、LiDARからのデータを有線LANで取得する。実装はMacBookにC++を用いて行い、二値画像処理のためにOpenCVを用いている。タイヤ領域のラベリングのための探索領域は、カートの最高速度を考慮して、各タイヤ座標から距離が30(cm)以内とした。

街CG生成システムは従来システムからの変更はない。そして、500×500(cm)に相当するエリアだけのお絵描きを行い、そこから建物やオブジェクトの生成を行った。そのため、今回の実験は三次元CG都市としては非常に狭いエリアとなっている。なお、今回の実験では車CG生成システムは使用しなかった。

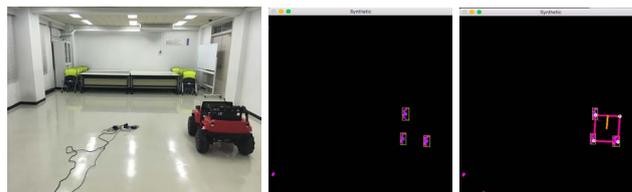
カート用CG映像&フィードバックシステムは前述のようにカートのボンネットに設置している。実装はMacBookProにC++を用いて行い、三次元CG映像生成のためにOpenGLを用いている。システムは、街CG生成システムから取得した建物CGに関する情報に基づいて三次元CG都市を構築する。このとき三次元CG都市内において、実空間のカート走行エリアの境界に相当する部分に高さ50(cm)の壁を設置することで、カート運転中に範囲外に出ることを視覚的に抑制している。

また、カート追跡システムが取得したカートの二次元座標と方向の情報は無線LANのTCP通信を經由して30(fps)で受信して、三次元CG都市内の仮想カートに反映させている。仮想カートと各建物CGとの衝突判定は中心座標同士の距離(50(cm)以内)だけを用いており、衝突したと判定場合にはCG建物を破壊して消去している。振動フィードバックは未実装である。

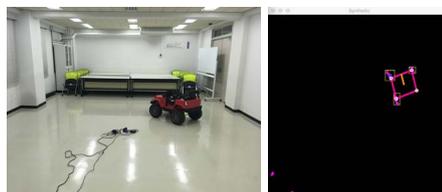
## 5.2 実験

図7に二次元LiDARに基づくカートの位置と方向の取得の様子を示す。この例では、移動前の状態は1つのタイヤが他のタイヤで隠されており、抽出できたタイヤ領域は3つのため、タイヤ座標は3つしか取得できていないが、取得できたタイヤ座標から残りのタイヤ座標を計算で求めている。そして、カートの位置と方向が正しく取得できていることを確認した(図7(a))。また、前フレームのラベリング結果とタイヤ座標を用いることで、カートが移動した場合でも現フレームのタイヤ領域が正しくラベリングされて、移動するカートの位置と座標を連続的に取得できることを確認した(図7(b)(c))。

図8にカート用CG映像&フィードバックシステムで仮想カートの視点から見た三次元CG映像を生成した様子を示す。カートはリモコンで操縦している。実際のカートの位置と方向が三次元CG都市内の仮想カートの位置と方向



(a) 移動前の状態



(b) 移動状態(1)



(c) 移動状態(2)

図7 二次元LiDARによるカートの位置と方向の取得

に反映されて、カートの移動に同期して生成される三次元CGが適切に変化していることが確認できた。そのため、生成されたCGをカートに乗って観察した場合には、実際にCG空間内を運転しているような感覚が得られることが期待される。

ただし、カートの移動に対する追跡結果算出の遅延は最大で約0.4秒発生する場合があった。原因としては、処理速度の不足の他、タイヤ領域抽出のための膨張処理に伴う平滑化の影響が考えられる。

そこで、カートに被験者が乗り込んで、カート用CG映像&フィードバックシステムの画面を見ながら運転できるかどうかを確認する実験を行った。被験者は20代の女性1名である。図9に実験の様子を示す。被験者に対する聞き取り調査では、システムの画面を見ながら十分に運転可能であるという回答を得た。また、遅延についてはほとんど気にならないという回答であった。ただし、画面サイズ等の影響で遠近感を十分に把握できない場合があり、運転に没入しすぎると実空間の壁に衝突しそうな場合があった。

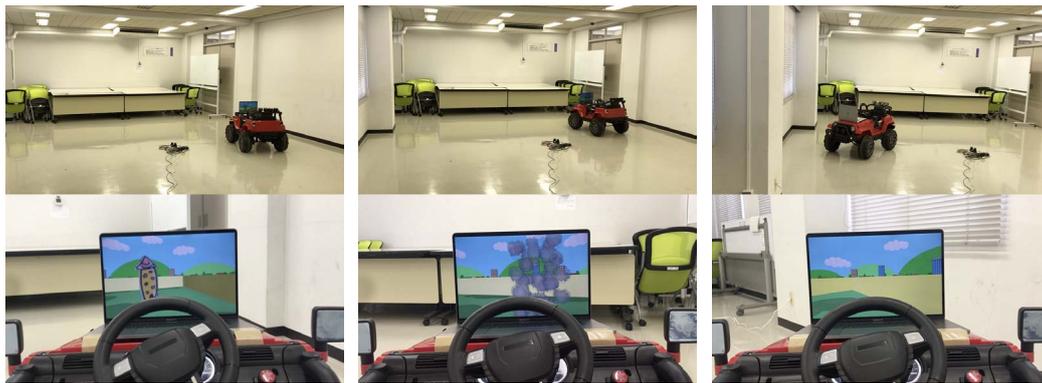
## 6. まとめ

本研究では、実際のカートを自由に運転しながら、自分のお絵描きから生成した三次元CG都市内に没入して移動するような体験が可能な「不思議なスケッチブック・ザ・ライド」を開発した。ここでは、仮想カートと三次元CG都市内のオブジェクトとの関係を映像でフィードバックすることも実現した。本研究で実現したような体験が可能な



(a) 移動前の状態

(b) 移動し始めた状態



(c) CG 建物の手前の状態

(d) CG 建物に衝突した状態

(e) エリア端に移動した状態

図 8 実空間のカートと 3DCG 空間の仮想カートの移動の同期の様子



図 9 カートに乗車して運転する実験の様子

インタラクティブデジタルコンテンツはこれまでになく、イベント等で実施すれば子供を中心とした多くの人に楽しんでもらえることが期待される。

今後は、今回実装しなかった振動等を用いたフィードバックも実現することでインタラクティブ性をより高める拡張も考えている。そして、床面や壁へのプロジェクションマッピングと組み合わせて、より高い没入感のあるエンタテインメントコンテンツに発展させるつもりである。

#### 参考文献

- [1] チームラボ, “お絵描き水族館”, [https://futurepark.teamlab.art/playinstallations/sketch\\_aquarium/](https://futurepark.teamlab.art/playinstallations/sketch_aquarium/) (2013).
- [2] ワンダープラネット, “SKETCH RACING”, [https://litpla.com/attraction/sketch\\_racing/](https://litpla.com/attraction/sketch_racing/) (2018).
- [3] 水野慎士, 内藤将司, 岡部紗千子, 磯田麻梨乃, 伊藤玲, 岡本芽唯, 近藤桃子, 杉浦沙弥, 中谷有希, 廣瀬元美, “「お絵描きダンスステージ」の提案”, 情報処理学会インタラクシオン 2015 論文集, C69, pp. 989–993 (2015).
- [4] S. Mizuno, “Digital Contents for Creating and Watching 3DCG of Vehicles Based on Drawing”, Proc. of IEVC 2019, 5A, 7pages (2019).
- [5] 水野慎士, “手描き 3DCG 空間内に没入して移動するコンテンツの提案と開発”, 情報処理学会研究報告, Vol. 2020-DCC-25, No. 2, 8pages (2020).
- [6] カヌチャリゾート, “ムーンライトクルーズ”, <https://www.kanucha.jp/feature/stafan/event/moonlightcruise/> (2019).
- [7] Master of Shapes, “VR GO KARTS”, <https://masterofshapes.com/work/vr-go-karts/> (2018).
- [8] meleap, “HADO KART”, <https://meleap.com/hadokart/coinrush/jp/> (2018).
- [9] 任天堂, “マリオカートライブホームサーキット”, <https://youtu.be/LvPON803cOQ> (2020).
- [10] Inigo Quilez, “Quill: VR drawing in the production of Oculus Story Studio’s new movie”, SIGGRAPH 2016, Real-Time Live! (2016).
- [11] 水野慎士, “輪郭検出を用いた「不思議なスケッチブック」の CG 表現拡張とイベント展示のためのビューア開発”, 芸術科学会論文誌, Vol. 17, No. 4, pp. 72–82 (2018).