

デジタルツインを活用した実車とシミュレータとのリアルタイムレースバトルの実現

井上 円^{1,a)} 桜井 広和^{3,b)} ウー シュエハン^{1,c)} 幸田 健介^{1,2,d)} チェング ケルビン^{1,2,e)}
益子 宗^{1,2,f)}

概要：本論文では、デジタルツイン技術を用いて実世界のレースと e レースをリアルタイムで融合した全く新しい体験について述べる。我々の構築したシステムは、レース車両のセンサデータがテレメトリを経由して仮想空間に送信される。仮想空間では実車の挙動がリアルタイムで再現される。実験では、富士スピードウェイのレース車両のセンサデータを東京のシミュレータ会場で受信し、実験当日に富士スピードウェイで開催されたレースイベントをリアルタイムで仮想空間内に再現する事で、富士スピードウェイを走行するレース車両と東京に設置されたシミュレータ会場のシミュレータユーザがリアルタイムで競技する事が確認された。

1. はじめに

デジタルツインとは、物理空間に存在するものを記述する一連の仮想的な情報構造体であり、シミュレーションの一種である。従来のシミュレーションとの違いは、物理空間の変化と仮想空間の変化がリアルタイムで連動している点である。例えば、従来のシミュレーションでは、物理空間の物体の動きや物質の変化は事前条件として仮想空間に設定されたが、デジタルツインでは物理空間の現象はセンサデバイスを用いてサーバ上に構築された仮想空間に忠実に再現される。物の情報がインターネットを通してクラウドやサーバ上に収集されるこの様な仕組みは Internet of Things (IoT) と呼ばれるが、デジタルツインや IoT の社会実装には高速・大容量・低遅延の通信が必要となり、5G 通信が重要な要素技術となる。

一方、産業界に着目すると、近年では車のシミュレータの精度が向上している。シミュレータは実車の計測データに基づいて車両の挙動が制御されており、シミュレータを介して本物のレーシングカーを操縦するような体験が得られる。それに応じてシミュレータユーザのニーズも加熱し



(a) An e-racer's view



(b) A real driver's view at Fuji Speedway



(c) Third eye views of both racers. Left side figure shows real race cars. Right side figure shows e-race cars.

図 1: The overview of the battle of a real racing driver and an e-racer.

ており、レーシングドライバも参加するシミュレータの大会もインターネットを通じて開催されている。シミュレータユーザの中には、サーキットの車両と直接競技したいという意見も少なからず見られる。そこで我々は、デジタルツインを活用してシミュレータユーザとサーキットを走行する実車のレーサがリアルタイムで競技するシステムを実現した。

¹ 楽天モバイル株式会社

² 楽天技術研究所

³ 株式会社 M-TEC

a) madoka.inoue@rakuten.com

b) hirokazu.sakurai@mugen-power.com

c) hsuehhan.wu@rakuten.com

d) kensuke.koda@rakuten.com

e) kelvin.cheng@rakuten.com

f) so.masuko@rakuten.com

本論文では、シミュレータにサーキットを走行する実車のレーシングカーのデータをリアルタイムで送信し、実車のレーシングカーとリアルタイムで競技するシステムについて述べる。レーシングカーは、富士スピードウェイで開催されるレース規格である Inter Proto Series (IPS) の公式競技車両 kuruma を使用する。競技車両のセンサから取得したデータをシミュレータ上で再現し、遅延時間 140[msec] で競技車両とのレースを実現する。図 1 にリアルタイムレースの概要を記す。

2. 関連研究

車両のシミュレータの研究は、Jamson[1] らに代表される研究機関による大規模なものだけでなく、Konstantopoulos[2] や Crundall[3] らのようにディスプレイに工夫を加えた数多くの研究が進められている。また、カーレースゲームに遅延を加えて、ゲームユーザの体感品質を調査する研究も行われている。Sabet ら [4] は、カーレースゲーム”Need for Speed Shift 2” に 350[msec] の遅延を加え、ゲームユーザの体感品質を調査した。その結果、遅延がゲームユーザの体感品質に大きな影響を与えることを確認した。Pantel らは、リアルタイムのカーレースゲームにおける遅延の影響について研究した。Pantel らの実験では、モデルカーを操作する仮想レーシングゲームを構築し、レーシングカーの操作とゲーム内での車両の反応の間に遅延を加える実験を行った。0[msec] から 500[msec] まで遅延を段階的に増加させた結果、遅延が 150[msec] を上回ると、熟練ドライバーのゲーム成績が明らかに低下する事が示された [5]。カーレースゲームを活用した新しい操作方法の研究としては、Borthani ら [6] による車両のコントロールに脳波を利用する研究も進められている。また、近年では車に取り付けたセンサデータをリアルタイムで遠隔地から受信するテレメトリに関する研究も進んでいる。テレメトリを活用した研究としては、Modoni ら [7] による Fomura One のテレメトリデータをデータ解析や製造に活用する研究が進められている。Sternal ら [8] は、自身が開発したレース車両とテレメトリでシェルエコマラソンに参加し、その研究結果について報告をしている。同様にレーシング車両に搭載するテレメトリの研究として、Visconti ら [9] や Ayyad ら [10] は、Formula SEA に搭載するテレメトリについて研究した。

これまで述べた先行研究はシミュレータとテレメトリを個別に研究したものであるが、近年、シミュレータと実車の統合を目指した研究も進められている。四方 [11] らは実車と車両シミュレーションの融合を目的とした仮想環境を構築した。

本研究はこれまで述べたようなシミュレータ、テレメトリ、または仮想環境などの単一の研究ではなく、これらを融合した実車とシミュレータを連動した研究であり、実験

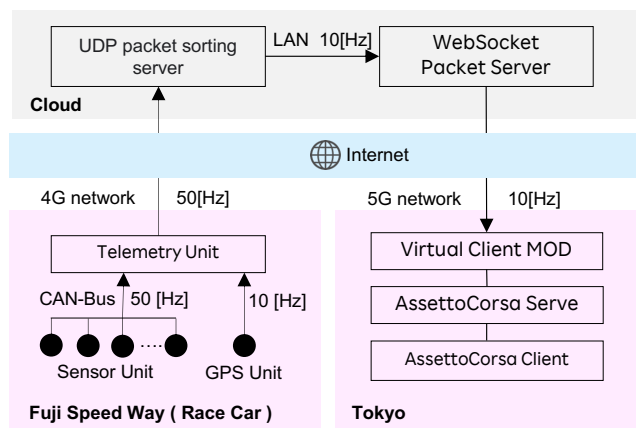


図 2: System overview with data communication and data translation rate.

によりその効果を検証した点が過去の先行研究とは異なる。

3. 背景

本システム実現の背景には、富士スピードウェイで開催されている IPS と呼ばれるカーレースと、レースシミュレータ Asetto Corsa を使用してインターネット上で開催されている e レースの Inter Proto e Series (IPeS) の二つのレースが関連する。本章では IPS と IPeS の概略について述べる。

IPS は、インタープロトモータスポーツが主催するレースで、2013 年から日本のサーキットの富士スピードウェイで開催されるワンメイクレースである。競技の特徴は、全ての競技者が統一規格の車両を同じ設定で使用する点である。年間で 4 回のラウンドが開催される。全てのラウンドは富士スピードウェイで開催され、1 ラウンドは 2 日間通して競技が行われる。

IPeS は、ドリームレーシングプロジェクト (IPeS 事務局) の主催する e レースである。レースシミュレータ Asetto Corsa 上で行われる競技であり、2019 年からインターネット上で開催されている。会場は仮想空間上に構築された富士スピードウェイであり、IPS の競技車両の走行データの解析結果と CAD データから再現された仮想空間上の車両を使用する。競技は実車同様のレースフォーマットで勝敗が決定される。年間 5 回の試合が行われ、e レースでの年間チャンピオンを決定する大会となる。IPeS には IPS に出場するプロの実車レーサも出場しており、シミュレータ上でプロレーサと e レースの腕を競えるイベントである。

4. システム

我々の構築したシステムの概略を図 2 に記す。システムは富士スピードウェイを走行するレースカーのセンサデータを取得する。センサデータはテレメトリユニットから 4G 通信回線を経由して、リアルタイムでクラウド上のテレメトリサーバに送信される。テレメトリサーバは受信した



図 3: The appearance of the racing car “Kuruma” .

データの頻度を調整し、シミュレータのサーバにインターネット回線を通じて送信される。シミュレータのサーバでは受信したデータを車両データに変換し、シミュレータのクライアントにデータが送信される。最後に 5G 回線を通じて受信したデータがシミュレータのクライアントに表示される。その結果、ユーザは自身が操作するシミュレータ内で、富士スピードウェイを走行するレーシングカーと同時刻に仮想空間内で競技することができる。また、Assetto Corsa が実装する車両同士の衝突判定を ON にする事で、実車とシミュレータの接触を判断する事が可能となり、より実車の走行に近い体験が得られる。ただし、現時点ではシミュレータ内で発生した接触を実車にフィードバックする仕組みは実装されていない。そのため、本論文は接触判定の無効を前提とする。

4.1 レース車両

実験には IPS の公式競技車両である kuruma を使用する。kuruma は IPS 専用に設計されたレーシングカーである。この車両は 3950[cc] のエンジンを搭載し、富士スピードウェイのホームストレートの速度はおよそ 250[km/m] に達する。トップレーサは富士スピードウェイのコースをおよそ 1 分 43 秒で周回する。図 3 に kuruma の外観を記す。車両には走行状態を計測するためのセンサと位置情報を捕捉する為の GPS を搭載する。エンジン回転数とギヤはエンジン音の再現に利用される。roll angle, pitch angle は車の傾きを再現する為に用いられる。heading を用いることで車の向きを取得する事が出来る。時刻毎の車両の位置は GPS の緯度経度情報で把握するが、データの受信に失敗した場合には位置情報の欠損が発生する。その場合には、過去の速度情報とステアリング角度を用いて位置情報を補完する。車軸回転角速度はタイヤの回転を描画する為の情報として用いる。GPS データの位置情報とセンサデータは、車両に搭載されたテレメトリユニットを経由してサーバに送信される。センサとテレメトリ間の通信は Controller Area Network (CAN) と呼ばれるシリアル通信プロトコルを用いる。CAN は相互接続された機器間のデータ転送に使われる規格であり、1993 年に ISO 11898 で国際規格として標準化された。CAN は車載機器のデータ通信に広く用いられている。GPS ユニットには ublox 社製の ZED-F9R



図 4: Software configuration.

を用いる事で、高速で走行するレーシングカーの位置情報を高精度に補足する。今回の実験では GPS アンテナを車両の天井部分に設置する。

4.2 シミュレータソフトウェア

IPeS を実行する為のソフトウェアは、Assetto Corsa 日本語 PC 版、または Assetto Corsa Ultimate Edition (DMM 版) と、MOD と呼ばれるシミュレータの機能拡張モジュールで構成される。IPS の専用車両である kuruma を使用する為の機能拡張には IPS kuruma 2019 (2020 アップデート版) の Cars MOD を用い、サーキットの機能拡張には Fuji International Speedway 2020 の Tracks Mod を用いる。さらに、本研究では実車の走行データをシミュレータ上の車両データに変換するための専用 MOD (Virtual Client MOD) を開発した。ソフトウェアのモジュール構成を図 4 に記す。Virtual Client MOD はクラウド上のテレメトリサーバからデータを受信するが、ネットワークの状況によりデータの受信に失敗する場合がある。その際、Virtual Client MOD は直前の位置と速度から現在位置の推定を行う。現在時刻を t 、時刻 $t-1$ の車両の 3 次元座標 $(cx_{t-1}, cy_{t-1}, cz_{t-1})$ を C_{t-1} 、時刻 $t-1$ の車両の速度 $(vx_{t-1}, vy_{t-1}, vz_{t-1})$ を V 、時刻 t と $t-1$ の時刻差を Δt とすると時刻 t における車両の位置 (cx_t, cy_t, cz_t) である C_t は式 (1) で求められる。

$$C_t = C_{t-1} + V\Delta t \quad (1)$$

4.3 サーバ

我々のシステムは、実車データをシミュレータ上に再現する為に 3 種類のサーバを利用する。はじめに UDP パケットサーバがテレメトリから受信した UDP パケットを送信時間順に並べ替える。次に、並び替えられた UDP パケットは WebSocket サーバに送信される。Web ソケットパケットサーバは UDP パケットサーバから受信したデータを JSON 形式のテキストデータに変換し、WebSocket でバーチャルクライアント Mod に送信する。最後に AssettoCorsa サーバは Web ソケットパケットサーバからバーチャルクライアント MOD 経由で受信したデータを AssettoCorsa の車両データの形式に変換し、シミュレータに入力する。

4.4 通信仕様

実車に搭載されたセンサは、データを 50[Hz] で取得す

る。GPS モジュールはデータを 10[Hz] で取得する。テレメトリは取得したセンサデータを 50[Hz] に変換する。その際、GPS は直前に計測された値で補完される。次にこれらのデータはテレメトリから LTE ネットワークを介して UDP プロトコルで UDP 仕分けサーバに 50[Hz] 送信される。センサデータと GPS データを合わせた UDP パケットデータサイズは 768[byte] である。UDP 仕分けサーバではテレメトリから受信したパケットのデータの並び替えを行い WebSocket サーバに送信する。WebSocket サーバでは LTE ネットワークを介して WebSocket で VirtualClient に 10[Hz] で送信する。VirtualClient は、仮想の AssettoCorsa クライアントとして AssettoCorsa サーバにデータを送信する。AssettoCorsa サーバでは、シミュレータから受信した車両情報と実車から VirtualClient を介して受信した車両情報を同じコース上で表示する。

通信遅延の許容値は 150[msec] とする。これは、Pantel らの研究 [5] に基づいて決定した。Pantel らは、研究によりレーシングゲームの操作性と遅延の関係を明らかにした。研究概略は以下である。ゲーム上のレーシングカーの操作を行う際に、画面を表示処理に対して任意の時間の遅延を挿入する。遅延時間は 50[msec] 間隔で最大 500[msec] まで増加される。実験ではこの時のラップタイムが観測された。実験結果によれば、ドライビングのエキスパートが操作した場合、遅延が 150[msec] を超えるとラップタイムが大きく増加する事が観測された。これは遅延が 150[msec] 以上生じた際にゲームの操作性が急激に低下することを示す。Pantel らの実験結果に基づき、我々は遅延の許容範囲を 150[msec] 未満とした。

5. 実験

構築したシステムを用いて、e レーサーが仮想空間内で実車のレースに参加する実験について述べる。実験は 2022 年 10 月 23 日に富士スピードウェイで開催された 2022 Inter Proto Series POWERED BY KeePer 第 2 大会の決勝 3 レースで実施した。富士スピードウェイを走行するレースカーからリアルタイムでセンサと GPS のデータを取得し、シミュレータによって構築された仮想空間内のレースカーに反映する。シミュレータには仮想空間の富士スピードウェイが再現されており、実空間の富士スピードウェイを走行するレースカーがリアルタイムでシミュレータに描画される。e レーサーは仮想空間内で IPS の決勝レースで走行するレースカーとリアルタイムでレースを行う。レースは 9:15 から 9:45 分の 30 分間、15:10 から 15:30 の 20 分間と、15:40 から 16:00 までの 20 分間の 3 回開催された。当日の天候は晴れて路面はドライ、気温は 20 度から 25 度で推移した。また最大風速は 14 時に南西の風 2.2[m] を観測した。決勝レースは 10 台の車両が参加したが、実験では実車の 1 台のみにセンサを搭載し、センサを搭載した 1 台の車両と



(a) The overview of the simulator environment from Tokyo. (b) The detail of the simulator.

図 5: The Simulator environment.

東京の e レーサーとの 1 対 1 の対決を行う。実験で使用する車両は車両番号 37 番の KeePer 号を使用し、福住仁嶺選手がドライバーとして乗車する。福住選手は、2022 年の IPS でランキングが 6 位、17 ポイントを獲得している選手である。決勝戦第一レースでは福住選手はレース参加車両 10 台中 5 番グリッドからスタートし 4 位でゴールした。決勝戦第二レースではレース参加車両 10 台中 4 番グリッドからスタートし 4 位でゴールした。レース当日の福住選手のベストラップタイムは決勝第 1 レースでは 1 分 46.415 秒、第二レースでは 1 分 46.248 秒である。なお、富士スピードウェイのコース全長は 4563[m] で、SUPER FORMULA クラスのコースレコードは 1 分 19.972 秒である。

一方、東京では e レーサーがシミュレータで実車と対戦する。東京に設置されたシミュレータ環境を図 5 に記す。実車とシミュレータが対戦するためには、スタート時刻を揃える必要がある。ここで、実験のスタートの同期方法について述べる。一般的にカーレースのスタート方法はスタンディングスタートとローリングスタートの 2 種類が用いられる。F1 などのフォーミュラカーレースでは、車両が静止した状態で、信号機がスタートを示した時点でレースが開始されるスタンディングスタートが用いられる。一方、IPS ではローリングスタートと呼ばれるレース開始方法が用いられる。ローリングスタートとは、グリッドに整列したレース車両をペースカーが先導し、スタート地点に戻ったところでペースカーがピットに退避し、そのままレースが開始されるスタート方式である。本実験では e レーサーのスタートを実車のローリングスタートに合わせる。e レーサーは実車がローリングラップを終えてスタート地点を通過した時点で競技を開始する。スタンディングスタートは時刻が基準となるスタート方式である為、遠隔地での時刻同期が必要となるが、ローリングスタートは車両がスタートラインを通過した時点でレースが開始されるため、位置が基準となるスタート方式である。車両の位置情報を補足しておく事で、遠隔地間のスタートの同期が比較的容易となる方法であり、本実験に適したスタート方式である。

実験には 2 名の e レーサーが参加する。ひとりは ZENKAIRACING e-Sports Team に所属する川戸育真選手

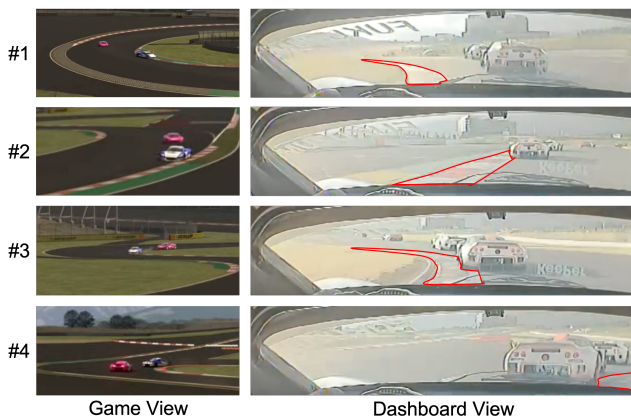


図 6: The comparison between the actual car position and the game view based on GPS data. Left side figures are shown game view. Right side figures are shown actual car view. Red markers of right figures are shown curb.

で、もう 1 名は山中真生選手である。山中選手は FOMULA DRIFT JAPAN に参戦する実車のレースドライバであり、2022 年 10 月現在でランキング 10 位、206 ポイントを獲得した選手である。この 2 名が予選と決勝の合計 3 レースにシミュレータで参加した。その結果、全てのレースにおいてシミュレータ内で実車とリアルタイムで競技できる事を確認した。また、レース中の状況を記録するために実車のダッシュボード映像と、シミュレータの画面を各々録画した。記録された画像の一部を図 6 に記す。

仮想空間に実車の状態を反映する為には、データの伝送遅延、実車の位置精度が重要になる。実験ではこれらのデータの精度について計測した。計測結果について以下に記す。

5.1 伝送遅延

図 2 に示すテレメトリユニットと AssettoCorsa サーバ間の通信で平均 140[msec] の遅延が発生した。テレメトリユニットと UDP パケット仕分けサーバ間の通信遅延は平均 30[msec]、クラウドサーバ内の処理遅延が平均 16[msec]、さらに WebSocket パケットサーバと AssettoCorsa サーバ間の通信遅延が平均 94[msec] である。

5.2 位置精度

GPS の精度評価には、HDOP, Antenna Level, STAT を指標値として用いる。GPS の精度 HDOP (Horizontal Dilution of Precision) は、PDOP (Position Dilution of Precision) の水平成分を指数化した値である。HDOP は衛星の幾何学的配置を指数化した値であり、位置精度は天空における GPS 衛星の配置による影響を受ける。この値が小さければ位置の精度が高く、大きければ位置の精度が低い事を示す。今回の実験では秒間 10 回の位置情報を取得した。実験期間中の HDOP の平均値は 0.51 でデータのばら

つきを示す分散値は 0.00018 である。STAT は衛星補足個数を示す。今回の実験では 12 個の衛星を補足した。

6. 考察

5.2 節では GPS の精度について指標値を用いて示したが、ここでは図 6 を基にその値の妥当性について考察する。図 6 はサーキットの 4 箇所記録されたシミュレータ画面と実車の視野の比較である。左側の画像はシミュレータ画面の映像を表し、右側のカメラ画像は実車のダッシュボードに設置されたカメラから取得した画像である。左側のシミュレータ画面には 2 台の車両が表示されているが、ピンク色の車がシミュレータ車両で青白の車が実車を表す。青白の実車はテレメトリから受信した GPS データに基づいてシミュレータ画面に描画される。右側のカメラ画像は実車のカメラ映像であり、シミュレータ画像の青白の車両のダッシュボードの映像に相当する。また、カメラ画像に表示した赤枠はコース両端の赤と白で塗られた縁石を記す。#1 に着目すると、シミュレータ画面の青白の車両はコース左側の縁石に乗り上げている事が確認できる。この時、#1 の実車の映像を見ると車両の左タイヤは縁石上に乗り上げている事が確認できる。同様に #2 でもシミュレータ画面の実車がコースの左側を走行している場合に、実車の映像も同じくコースの左側を走行している事が確認できる。#3, #4 についても同様である。これらの結果から、我々の構築したシステムはサーキットを走行する車両の走行ラインを再現する事が可能であり、その誤差もタイヤの幅程度と考えられる。e レーサとのシミュレータ内での走行という目的を考えた場合、この精度は十分であると考えられる。

本章の最後に、本研究の社会的意義について述べる。将来的には、道路を走行する全ての車に様々なセンサが取り付けられ、車の詳細な走行状況を取得できる可能性がある。そのような社会が到来した場合に、本研究の技術が、デジタルツインだけではなくサイバーフィジカルシステムとして活用可能となる。以下で各々の社会実装例について述べる。はじめに、デジタルツインの応用は車の運転経験のないドライバの訓練である。運転経験のないドライバが車の運転を練習する際に、実空間で練習する事で事故を引き起こす可能性がある。この問題を解決するためのシミュレータも開発されているが、運転シナリオはパターン化された物であり、ドライバは十分な運転経験を積めるとは言い難い。しかし、本研究の技術を用いる事で、実空間の車両の走行状況を仮想空間に反映することが可能となる。その結果、運転経験のない者が実空間の様々な状況に合わせたトレーニングを事故のリスクのない仮想空間内で行う事が可能となる。次に、サイバーフィジカルシステムの応用は実空間上の日常的な車同士の衝突事故防止である。近年画像処理技術や LiDAR などのセンサ技術の発達により、直接的に認識可能な周辺車両との衝突事故は軽減されつつ

ある。しかしこれらの技術も膨大な過去のデータを統計的に処理した結果に基づいた判断による物であり、誤検出に対する課題が存在する。さらに、これらの技術は、交差点などの視界が遮られた場所での周辺車両の状況把握が出来ない。一方、我々の技術はセンサからの直接的な情報で周辺車両の状況を把握するために、統計的な判断による曖昧さを排除する事ができる。また、視界の遮蔽された状況でも正確に周辺車両の状態を把握する事ができる。従って、サイバー空間で検出した危険をフィジカル空間にフィードバックする事で、日常的に発生する車両同士の事故を軽減できると考える。

7. おわりに

本研究では、デジタルツイン技術を活用し、シミュレータユーザとサーキットを走行するレーサがリアルタイムで競技するシステムを実現した。富士スピードウェイで開催される実車レースである IPS の競技車両から取得したデータをシミュレータに反映し、実車のレーサと e レーサがリアルタイムで競技する実験を実施した結果、データの遅延時間が 140[msec] で、実車の表示位置の誤差がレース体験に許容し得る範囲である事が確認された。

実験で得られた知見については、エンターテインメント分野への展開だけでなく、運転技術の向上支援や交通システムへの応用が期待できる。技術の応用展開を念頭に置き、引き続き研究を進めたい。

参考文献

- [1] A. H. Jamson, A. J. Horrobin, and R. A. Auckland, "Whatever happened to the lads? design and development of the new university of leeds driving simulator," in Proceedings of the Driving Simulation Conference, Driving Simulation Association. Citeseer, 2007.
- [2] P. Konstantopoulos, P. Chapman, and D. Crundall, "Driver's visual attention as a function of driving experience and visibility. using a driving simulator to explore drivers' eye movements in day, night and rain driving," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 42, no. 3, pp. 827-834, 2010.
- [3] D. Crundall, P. Chapman, S. Trawley, L. Collins, E. Van Loon, B. Andrews, and G. Underwood, "Some hazards are more attractive than others: Drivers of varying experience respond differently to different types of hazard," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 45, pp. 600-609, 2012.
- [4] Sabet, S. S., Schmidt, S., Zadtootaghaj, S., Griwodz, C., and Moller, S. (2018, December). Towards applying game adaptation to decrease the impact of delay on quality of experience. In 2018 IEEE international symposium on multimedia (ISM) (pp. 114-121). IEEE.
- [5] Pantel, L., and Wolf, L. C. (2002, May). On the impact of delay on real-time multiplayer games. In Proceedings of the 12th international workshop on Network and operating systems support for digital audio and video (pp. 23-29).
- [6] Borhani, S., Yu, J., Cate, J., Kilmarx, J. A., Abiri, R., and Zhao, X. (2018, October). Clash of minds: A BCI car racing game in simulated virtual reality environment. In 2018 Biomedical Engineering Society (BMES) Annual Meeting.
- [7] Modoni, G. E., Sacco, M., and Terkaj, W. (2016). A telemetry-driven approach to simulate data-intensive manufacturing processes. *Procedia CIRP*, 57, 281-285.
- [8] Sternal, K., Cholewa, A., Skarka, W., and Targosz, M. (2012, October). Electric vehicle for the students' shell eco-marathon competition. design of the car and telemetry system. In International Conference on Transport Systems Telematics (pp. 26-33). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [9] Visconti, P., Sbarro, B., Primiceri, P., de Fazio, R., and Lay-Ekuakille, A. (2019). Design and testing of an electronic control system based on STM X-Nucleo board for detection and wireless transmission of sensors data applied to a single-seat formula sae car. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 671-678.
- [10] Ayyad, A., and Fathizadeh, M. (2017, October). Telemetry and data collection to improve formula SAE car. In World Congress on Engineering and Computer Science, WCES.
- [11] 四方隼人, 山下哲生, 荒井光司, 中野貴之, 畑中健一, and 藤川裕之. (2019). 車両シミュレーションと実車検証を統合するデジタルツイン環境の構築. *SEI テクニカルレビュー*, (194), 14-18.