

ヘッドマウントディスプレイを用いたモデル車両遠隔操作システムの開発

野口 祥央¹ 古庄 裕貴^{1,a)} 中西 恒夫^{1,b)}

概要: ヘッドマウントディスプレイに車両に搭載したカメラが捉えた3次元映像をネットワーク経由でリアルタイム表示することで、実車に近い感覚で遠隔の操縦者が車両を操縦するシステムを開発する。本稿では実車に代えてモデル車両（ラジコンカー）を使用している。試作したシステムを評価したところ、システムは一定の没入感を遠隔の操縦者に与えることには成功したものの、多くの操縦者は車両の運転上のフィーリングに関して違和感を訴える結果となった。実車に近い感覚を再現するためには、映像の低遅延、高フレームレートでの伝送に加え、音や振動、ハンドルやペダルの反力といった視覚以外の情報も重要であることが認識された。

A System to Drive a Remote Model Vehicle with the Head Mounted Display

SACHIO NOGUCHI¹ HIROKI FURUSHO^{1,a)} TSUNEO NAKANISHI^{1,b)}

Abstract: The authors develop a system that a remote driver can drive a vehicle via the wireless network as if he/she boarded the vehicle. The system shows three dimensional visions taken by the on-board stereo camera to the head mount display worn by the remote driver. In this work a model car, a radio controlled car, is used instead of the real car. The system succeeded in giving immersive feeling to the remote driver; however, many of them experienced discomfort in driving. It is recognized that sense of reality is brought by not only visions of less delay and more frame rate but also information other than visions including sound, vibration, and reaction forces of the steering and pedals.

1. はじめに

これまで車両を遠隔操縦する多くの試みがなされてきた。いくつかの事例を挙げると、米国の自動車メーカ、フォードは既製のモニタやゲーム用ハンドルコントローラを用い、何千 km 離れた地にある車両を操縦する技術を試験している [1]。また、産業技術総合研究所は、公道において電動カートを遠隔地から操作する試験を行っている [2]。車両の遠隔操作により、運転者が近づけない危険な場所への車両によるアクセスや、高齢や病気、障害、酩酊等の理由により運転できない状態にある者のために運転代行サービス

を提供することが可能となる。

しかし、車両の遠隔操縦は、実際に車両に搭乗しての運転とはビューや操作感が異なり、運転者のイメージしている車両の挙動と実際の車両の挙動に差が出がちであり、それゆえに誤って周辺の人や物への接触を生じる可能性がある。そこで本稿では、車両を遠隔操作できるシステムを試作し、実車に近い感覚で車両を操縦するうえで必要な要件や課題を明らかにする。もっとも現実の自動車を用いて研究することは安全上も法令上も困難であるため、自動車に代えて、縮尺 1/10 サイズのラジコンカーを改造したモデル車両を使用する。試作するシステムでは、ヘッドマウントディスプレイを装着した遠隔地にいる運転者に車両内に搭載したカメラからリアルタイムの 3 次元映像を提供し、遠隔の運転者が見るビューと現実の車両から見えるビューとの差をなくすことを試みる。また、遠隔の運転者による

¹ 福岡大学
Fukuoka University, Johnan, Fukuoka 814-0180, Japan
a) furusho@fukuoka-u.ac.jp
b) tun@fukuoka-u.ac.jp

運転操作を違和感なきよう実際の車両に反映させることを試みる。

以下、本稿第2節ではシステムに用いるデバイスについて紹介し、第3節では車両の遠隔操縦システムを試作し、第4節ではシステムの評価を行い、第5節では評価を踏まえて実車のように車両を遠隔操縦するうえで重要な要因を考察する。最後に第6節で本稿を総括する。

2. システムに用いるデバイス

本節では、車両遠隔操縦システムで使用するデバイスについて説明する。

シングルボードコンピュータ： 車両の駆動用モータと操舵用サーボの制御、車載ステレオカメラによる動画撮影とカメラマウントのサーボ制御、カメラ映像の送信、運転者からの操縦指令の受信のために、ARM プロセッサを搭載したシングルボードコンピュータ、Raspberry Pi3 Model B を使用する。

ラジコンカー： 本研究では実際の車両に代えて、図1に示す市販のラジコンカー（タミヤ製 TEAM HAHN RACING MAN TGS (TT-01 シャーシ TYPE-E)）を改造したモデル車両を使用する。このラジコンカーは前進、後退、ブレーキの機能を備えており、連続的な加速や操舵が可能である。



図1 ラジコンカー

ハンドルコントローラ： 運転者からの操舵、加減速の運転意図をとるべく、図2に示すハンドルコントローラ（HORI 製 Racing Wheel Apex）を使用する。当該ハンドルコントローラは、DirectX 11 のゲーム用コントローラの入力を読み取る API、XInput に対応しており、Windows 上のアプリケーションから利用することが可能である。

ヘッドマウントディスプレイ： 遠隔の車載ステレオカメラで撮影した映像を運転者に再現するべく、図3に示すヘッドマウントディスプレイ（FOVE 社製 FOVE0）を使用する。このヘッドマウントディスプレイにはヘッドトラッキング機能を有し、別途設置される装着者の顔に向けたカメラで装着者の頭の向きを画像処理的に測定し、ロー



図2 ハンドルコントローラ（Racing Wheel Apex）

ル角、ピッチ角、ヨー角として得られる頭の向きに合わせて両眼に Virtual Reality 映像を映し出すことができる。



図3 ヘッドマウントディスプレイ（FOVE0）

ステレオカメラおよびマウント： ラジコンカーの車載ステレオカメラは図4に示す自作のマウントに取り付けられている。ステレオカメラの画角は170度であり、両眼の間隔は35mmである。カメラマウントは3つのサーボモータによりステレオカメラのロール角、ピッチ角、ヨー角を設定できる。上述のヘッドマウントディスプレイで得られた頭の向きに同期してステレオカメラの向きを変えられるようにしている。サーボモータはRaspberry Pi3にI2Cで接続される12ビットPWMコントローラ（NXP製PCA9685）経由で制御される。

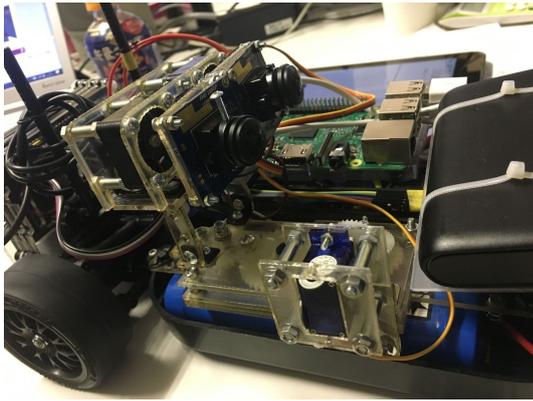


図 4 ステレオカメラおよびマウント

3. 車両遠隔操作システム

3.1 システムの概要

試作するシステムの概要を図5に示す。図中の矢印はコンポーネント間でやりとりされる制御ならびにデータの流れを示す。運転者はPCで車両の遠隔操縦を行う。PCに接続されたハンドルコントローラの操舵角、アクセル量、ブレーキ踏圧、ならびにヘッドマウントディスプレイから得られる運転者の頭のロール角、ピッチ角、ヨー角は文字列としてシリアルライズされ、TCP/IPのソケット通信により、無線ネットワークを経由して車両に送信される。車両上のシングルボードコンピュータはそれを受け取り、駆動モータと操舵サーボ、ステレオカメラマウントのロール／ピッチ／ヨーサーボを制御する。また、シングルボードコンピュータはUSB接続されたステレオカメラの映像をPCにストリーミング送信する。PCはそれを受信してヘッドマウントディスプレイにリアルタイム再生する。

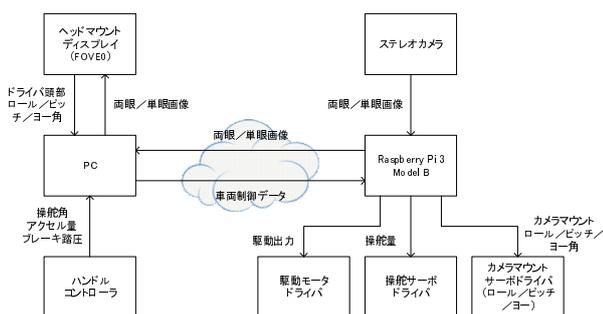


図 5 システム概要

3.2 ハンドルコントローラおよびヘッドマウントディスプレイからの入力の処理

試作システムで使用しているハンドルコントローラは、Windows, Xbox, Xbox 360, Xbox Oneなどのマイクロソフト製プラットフォームおよびデバイスのゲーム向けAPI群, DirectX 11に含まれる入力コントローラ用API,

XInput[3]に対応している。XInputを用いてハンドルの操舵角、アクセル量、ブレーキ踏圧、その他のボタンの押下状態を読み込むことが可能である。操舵角は16ビット、アクセル量、ブレーキ踏圧は8ビットの解像度で入力される。ボタンの押下状態は押されているか否かのデジタル値として入力される。本稿では触れないが、ボタンの押下状態はヘッドライトや方向指示器の点灯／消灯に用いている。

またヘッドマウントディスプレイからはヘッドトラッキング機能により装着者（つまりは運転者）の頭のロール角、ヨー角、ピッチ角が-1000から+1000の範囲で入力される。ロール／ヨー／ピッチ角の取得にはFOVE0のC++ SDKを使用している。

PCは読み取ったこれらのデータを文字列化し、空白で区切ってシリアルライズし、TCP/IPのソケット通信を用いて遠隔の車両に送信する。

3.3 車両の制御

試作システムで使用する車両は市販のラジコンカーを改造したものである。ラジコンカーの一般的なシステムを図6に示す。今回、使用するラジコンカーは受信機から出力される、57.6kHzのPWM信号により駆動用モータと操舵用モータを制御している。試作システムでは、図6の送信機を省き、受信器をシングルボードコンピュータ(Raspberry Pi)に換装する。PCから送られてくるデータから要求駆動量と要求操舵量を取り出し、シングルボードコンピュータにおいてPWM信号を生成し、ラジコンカーにもともと搭載されているESC(Electronic Speed Controller)に入力することで駆動用モータと操舵用モータを制御する。

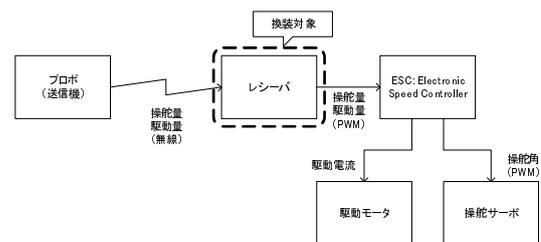


図 6 ラジコンカーのシステム

Raspberry Piでは、PWM信号の生成手段としてソフトウェアPWMとハードウェアPWMの2種類が選択できるが、ソフトウェアPWMはほかのプログラムのCPUの使用状況などに影響され安定した信号が生成できないため、ハードウェアPWMを使用する。PWM信号はRaspberry Pi用のGPIO制御ライブラリであるWiringPiを用いて生成する。

3.4 カメラマウントのサーボ制御

ステレオカメラを運転者の頭の向きと同期し、運転手が頭を向けている方向と同じ映像を撮影するため、サーボ

モータを取り付けたマウントを制御する。PC から送られてくるデータから運転手の頭のロール／ヨー／ピッチ角を取り出し、カメラマウントのサーボモータの出力角を PWM 信号で制御する。Raspberry Pi には PWM 出力が 2 チャンネルしかなく、それらは駆動用モータと操舵用モータの制御に使っているため、I2C 経由でつながる PWM コントローラでカメラマウントの制御を行っている。

3.5 ストリーミングによる映像の送信

ステレオカメラで撮影した 3 次元動画は MJPG-streamer[7] を用いて PC 側に送信する。MJPG-streamer は、ひとつまたは複数の入力プラグインから複数の出力プラグインに JPEG フレームをコピーするコマンドラインアプリケーションである。配信する際に解像度やフレームレート、ポート番号やパスワードが設定可能であり、映像の形式は MJPEG (Motion JPEG), もしくは YUV2 が選択できる。試作システムでは、3 次元表示を実現するべく両眼の映像を送信する方法と、データ転送量を抑えてリアルタイム性を確保するべく単眼の映像を送信する方法を選択できるようにしている。また、いわゆる VR 酔いを無くすために最低限必要なフレームレートは 60fps とされているが、使用しているカメラのフレームレートが 60fps の場合の最高解像度は 1280x720p であるという制約から、送信する映像は画質が 70% 程度の 1280x720p の解像度と 60fps のフレームレートで一律に設定している。映像の形式は Raspberry Pi のカーネルでは MJPEG 形式が使用できないため YUV2 形式 [5] を選択している。

3.6 ヘッドマウントディスプレイへの映像出力

試作システムでは、MJPG-streamer によって車載のシングルボードコンピュータから送信された映像を、OpenCV を用いてヘッドマウントディスプレイに出力する。ヘッドマウントディスプレイを装着した操縦者が両眼で見ている映像を図 7 に示す。



図 7 装着者の見ている映像

4. システムの評価

本システムの最終目標はなるだけ実車に近い感覚で遠隔の運転者が車両を操縦できるようにすることである。実車

に近い感覚での操縦を実現するには、車両の運転席から見える映像をいかに遠隔の操縦者に提示できるか、また遠隔の運転者の操縦操作をいかに車両に反映できるかが重要な要素となる。

4.1 通信品質が操作感に与える影響

車両の運転席から見える映像をどの程度の品質で遠隔の運転者に提示できるかは通信帯域、通信遅延、データ転送量に依る。本稿では遠隔の運転者と車両間のデータ転送量を変えて操作感の評価を行う。

運転者と車両間は Wi-Fi 同一セグメントで通信するものとする。通信帯域については TCP/UDP/SCTP 帯域測定ツール iperf3[8] を用いてネットワーク帯域を測定したところ平均 13.8Mbps、通信遅延については ping で計測したところ 60KB のデータパケットを送った場合 100ms であった。

データ転送量は単眼画像／両眼画像の転送の別、画素数、フレームレートによって決まる。本稿では、単眼画像を送る場合と両眼画像を送る場合、画素数は 1280×720、640×480、320×240 の 3 つの場合、フレームレートは 60fps と 30fps の 2 つの場合、合計 12 の場合について実験を行う。

この条件下で実際に車両を操縦した結果、遠隔の運転者には以下のような操作感が得られた。

Wi-Fi 環境下での単眼画像転送の場合:

- **1280×720, 60fps のとき:**
 - 画像はきれい。
 - しかし、画像の転送または処理が間に合わず、映像の再生はがたつく。
 - 運転はできないことはないが慣れを要する。
- **640×480, 60fps のとき:**
 - 画像はドットが目立つが運転上の支障はない。
 - 映像は滑らかに再生される。
 - 低速では運転しやすいが、速度が上がると画像の粗さのために運転しにくくなる。
- **320×240, 60fps のとき:**
 - 画像はモザイク状で何があるのかわからない。
 - 画像がモザイク状のため滑らかに再生されているかすらわからない。
 - 何があるか見えず運転はできない。
- **1280×720, 30fps のとき:**
 - 画像はきれい。
 - フレームレートが低い分、映像の再生はパラパラ漫画のようである。
 - 運転はできないことはないが慣れを要する。
- **640×480, 30fps のとき:**
 - 画像はドットが目立つ。
 - フレームレートが低い分、映像の再生はパラパラ漫画のようである。

- 画像の再生に滑らかさがないため、運転はできるがしにくい。

- **320×240, 30fps** のとき:

- 画像はモザイク状で何があるのかわからない。
- 画像がモザイク状のため滑らかに再生されているかすらわからない。
- 何があるか見えず運転はできない。

Wi-Fi 環境下での両眼画像転送の場合:

- **1280×720, 60fps** のとき:

- 画像はきれいだが、ブロックノイズがしばしば発生する。
- しかし、画像の転送または処理が間に合わず、映像の再生はがたつく。
- 立体状に見えるが、左右画像のずれが発生する。
- 運転はできないことはないが慣れを要する。

- **640×480, 60fps** のとき:

- 画像はドットが目立つが、ブロックノイズは出ず、運転上の支障もない。
- 映像は滑らかに再生される。
- 立体状に見えるが、左右画像のずれが発生する。
- 低速では運転しやすいが、速度が上がると画像の粗さのために運転しにくくなる。

- **320×240, 60fps** のとき:

- 画像はモザイク状で何があるのかわからない。
- 画像がモザイク状のため滑らかに再生されているかすらわからない。
- 何があるか見えず運転はできない。

- **1280×720, 30fps** のとき:

- 画像はきれいだが、ブロックノイズがしばしば発生する。
- フレームレートが低い分、映像の再生はパラパラ漫画のようである。
- 立体状に見えるが、左右画像のずれが発生する。
- 運転はできないことはないが慣れを要する。

- **640×480, 30fps** のとき:

- 画像はドットが目立つが、ブロックノイズは出ない。
- フレームレートが低い分、映像の再生はパラパラ漫画のようである。
- 立体状に見えるが、左右画像のずれが発生する。
- 画像の再生に滑らかさがないため、運転はできるがしにくい。

- **320×240, 30fps** のとき:

- 画像はモザイク状で何があるのかわからない。
- 画像がモザイク状のため滑らかに再生されているかすらわからない。
- 何があるか見えず運転はできない。

どの条件でも、いわゆる VR 酔いは発生し、長時間の遠隔操縦は難しい。

WiMAX を用いたインターネット経由での評価も行ったが、通信帯域は 1.99Mbps、通信遅延は 850ms もあり、どの条件でも全く実用に耐えなかった。

4.2 操作感に関する主観的評価

もっとも使用に耐える Wi-Fi 使用同一セグメントでの単眼画像転送の場合において、7名の被験者に試作システムで車両の操縦を依頼し、操作感に関する主観的評価を実施する。被験者は 20 代前半、自動車にはおおよそ 1 ヶ月に数回乗る程度であり、通学等で日常的に運転している者はいない。ハンドルコントローラによる操縦に加えて、一般のゲーム用コントローラによる操縦での評価も行う。

結果、車両の操作性について以下のような自由回答による評価が得られた。

- ユーザビリティについて:

- 眼鏡をかけての操縦ができるようにしてほしい。

- 映像再生について:

- 映像の再生が遅い。
- ロール、ヨー、ピッチだけでなく、前後、左右、上下方向のビューの移動も欲しい。

- 操縦のフィーリングについて:

- ステアリングの反応が少し遅い。
- アクセルペダルのタイムラグが気になる。
- アクセル、ブレーキ、ステアリングのフィーリングに違和感がある。
- 低速を維持して走行するのが難しい。

また、多くの被験者は自動車の運転ができるにもかかわらず、ハンドルコントローラよりも一般のゲーム用コントローラでの運転を好んだ。

5. 考察

本研究の目標としている、遠隔の運転者が実車に近い感覚で車両を操縦することは十分に達成することはできなかったものの、評価を通して、目標達成に寄与しうる幾許かの知見を得ることができた。主観的な知見であるが以下に述べたい。

- 運転操作のフィーリングは重要: 今回、ステアリング、アクセス、ブレーキの操作における違和感はほとんどの被験者によって指摘された。運転のしづらさの要因は、画像の質と遅延、操作上の違和感など複合考えられるが、運転操作でモノにぶつかったりするのはステアリングやアクセルが想定よりも利いているといった操作感の齟齬によるところが感じられる。もっとも、今回は実車ではなくラジコンカーを操縦している。ラジコンカーから見えるビューは実車とは全く異なるもので、どの運転者にとっても未経験の運転操作であり、運転経験は全く活かされない。そのためか多くの被験者はハンドルコントローラよりも一般のゲー

ムコントローラを好んだ。こうしたビューの違いも運転しにくさの一つの理由と考えられる。

- 視覚以外の情報も重要: 実際の運転では視覚のみならず、聴覚、振動やハンドルやペダルの反力などの力学的感覚も利用している。今回、車両から遠隔の操縦者には視覚情報しか送られていないが、音が聞こえないことに運転のしにくさを訴える被験者やモノにぶつかったことがわからないと訴える被験者が多かった。
- 高速になるほど画質が重要: 低速の運転では画質が悪くてもモノにぶつかることなく運転できるが、高速の運転では遠方の状況を早々に確認する必要があり画質が極めて重要となる。
- 画像の同期は重要: 遅延なく映像を送ることはもちろん、3次元で再生する場合は転送側において左右の映像を同期して転送することは重要である。

ヘッドマウントディスプレイによる立体視が必要であったかどうかは結論が出せていない。ヘッドマウントディスプレイによる没入感については一定の評価を得られたが、その反面、没入感がフィーリング上の違和感を招いたことも否めない。

6. まとめ

本研究は、ヘッドマウントディスプレイを装着した遠隔にいる運転者に車両に搭載したカメラからリアルタイム3次元映像を提供し、遠隔の運転者が実車のように車両を操縦できることを目標に掲げていた。結果として、Wi-Fi同一セグメントの通信環境下において、一定の没入感を達成しつつ車両を運転することはできたものの、転送する画像の画質、遅延、また運転フィーリング上の違和感などに多くの課題を残すこととなった。本研究は、車両の捉えた画像を没入可能な3次元映像として伝えれば遠隔の運転者は実車のように車両を操縦できるという仮説から始まったが、評価の結果、映像に関しては3次元の必要性に関しては不明、また画素数よりも遅延の低減とフレームレートが重要であること、さらに音や振動、ハンドルやペダルの反力といった視覚情報以外の情報も重要であることがわかった。

今後の課題としては、実車のような運転感覚を遠隔の運転者に再現するためには、どのような条件下でどのような要因が重要になってくるのかを明らかにすることが挙げられる。こうした要因を踏まえ、通信環境にあわせて、映像を遠隔の操縦者に最適化されたかたちで提供することも重要な課題と考える。

謝辞 本研究は科研費(課題番号: 15H05708)の助成を受けている。

参考文献

- [1] A. Davies, "Ford's Working on a Remote Control for Your Car," *WIRED*, <https://www.wired.com/2015/01/fords-working-remote-control-car/>, 26 Jan. 2015. (最終アクセス日: 2018年1月29日)
- [2] 産業技術総合研究所, 「ラストマイル自動走行の実証評価(輪島市)を開始」, <http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171213005/20171213005-1.pdf>, 2017年12月13日. (最終アクセス日: 2018年1月29日)
- [3] Microsoft Developer Network, 「XInputの基礎知識」, [https://msdn.microsoft.com/ja-jp/library/ee417001\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ja-jp/library/ee417001(v=vs.85).aspx). (最終アクセス日: 2018年1月29日)
- [4] Raspberry PiでAdafruitのI2C接続16-Channel PWM/Servo Driverを試してみた。、junkroom2cyberrobotics.blogspot.jp/2013/06/raspberry-pi-adafruit-i2c-16-channel.html、2018年1月26日
- [5] Raspberry Piに外部ネットワークからアクセスできるようにして携帯でペットを遠隔監視する方法、<https://qiita.com/kinpira/items/c9e6dc910e8d96e8c19b/>、2018年1月26日
- [6] mjpg-streamerのストリーミングをopencvで逐次処理する、<http://d.hatena.ne.jp/seinzumtode/20160712/1468317007/>、2018年1月26日
- [7] MJPG-streamer, <https://sourceforge.net/projects/mjpg-streamer/>. (最終アクセス日: 2018年1月29日)
- [8] iperf3: A TCP, UDP, and SCTP Network Bandwidth Measurement Tool, <https://github.com/esnet/iperf3>. (最終アクセス日: 2018年1月29日)