

## 通信品質の違いによる遠隔操作性の評価

### — RC カーを例として

菊池 浩明      安部 謙介      中西 祥八郎

東海大学工学部

**概要:** 医療分野や工場管理など、インターネットを介した遠隔制御が盛んに行われている。ところが、インターネットは帯域や伝送遅延などのサービス品質 (QoS) が一様でないネットワークが混在しており、これが制御対象によっては大きな影響をおよぼすことが懸念されている。例えば、高帯域を必要とするアプリケーションや、電子会議のように伝送遅延が致命的なアプリケーションがある。そこで、本研究では、通信品質が操作性にどのような影響を及ぼすかを明らかにするため、リアルタイム性が求められる遠隔操作車を扱う。操作車と操縦者の間には、映像と音声の会議システムが提供されている。そして、LAN, 無線 LAN, PHS, 携帯電話の4種類のQoSの異なる4種類の通信路を介して操縦操作が行われる。

## Usability Evaluation of Remote Control Vehicle in terms of Quality of Service

Hiroaki Kikuchi      Kensuke Abe      Shohachiro Nakanishi

Tokai university, Faculty of Engineering

**Abstract:** A remote control over the Internet opens up new applications including remote medical treatment, remote education, or conference. The current Internet, however, has not guaranteed the quality of service (QoS), which may be required from a variety of application. For example, a particular application requires a high bandwidth. A transfer delay is critical property with network conference. In this paper, we use a remote control vehicle in order to evaluate how much quality is required for real-time driving a vehicle. Our developed Internet-control vehicle supports a video and audio conference between the vehicle and the driver. Four types of communication network with various quality of services, including LAN, Wave LAN, Personal Handy Phone (PHS), and a cellular phone, are used to control the vehicle.

### 1 はじめに

低コストで双方向の通信を提供するインターネットによって、我々の生活環境が大きく変わろうとしている。インターネットを介した遠隔治療や電子会議など、その特性を生かした新しい応用も始まっている。

その一方で、通信回線の帯域不足や、伝送遅延などの問題が認識され、アプリケーションに応じたサービス品質 (Quality of Service) 保証などの技術が要請されている [1].

求められる QoS はアプリケーションに大きく依存

する。例えば、ビデオオンデマンドにおいては高帯域が必要だが、伝送遅延は多少大きくても構わない。電話のような対話的なアプリケーションでは、低帯域でも遅延が小さく、遅延のばらつき (jitter) も小さくなくてはならない。更に、マルチメディアを活用したアプリケーションには、複数のメディア間の同期が重要な要素である。このように、帯域、伝送遅延, jitter, パケット損失率, 同期などの QoS をどのように保証するかがインターネット応用の大きな一つの課題となっている [2].

しかし、帯域は ADSL, ATM, SONET, 衛星インターネットなどの導入により、高品質が保証される傾向にある [3]. 64kbps にも至る携帯電話のサービスが始まり、インターネットの接続できる行動範囲も更に広がっていくことであろう。ネットワーク資源予約プロトコル RSVP や ATM ネットワークにおけるシェーピングなどの技術が成熟すれば、QoS の保証もさほど困難ではない。残るは、どのアプリケーションがどれだけの QoS を必要とするのかを決定するための定量的な評価である。これには、エンドポイントである人間の生理的、認知科学的な研究が求められる。

そこで、我々は、遠隔操作の具体例として、Radio Control (RC) カーを取り上げる。RC カーの操縦は、動画像をリアルタイムに処理する必然性があり、オペレーターと車の間での対話的な処理も要求する。動的マルチエージェントと人工知能の研究対象として注目を集めているロボカップでも用いられている [4]. 人間に代ってインターネットにつながるところならばどこまでも走って行き、遠隔会話を中継する車は、我々のコミュニケーションの範囲を大きく広げることだろう。

本稿では、まず、実験システムの設計についてハードウェアとソフトウェアの両面から述べる。次に、QoS が操作性に及ぼす影響を評価するための実験方法と結果を報告し、考察を加える。

## 2 設計

### 2.1 システム構成

図 1 に全体のシステム構成を示す。本システムは、ユーザインターフェースを提供し、コマンドを送信する操縦部と RC カー本体である制御部から成る。制御部には RC カーの走行駆動系と全体の制御を行う Windows95 の走るノート型 PC がある。PC には、

データの送受を行うネットワークインターフェースと CCD カメラ、マイク、スピーカの入出力機、及びパラレルポート経由の走行駆動系制御ボードが接続されている。システムの緒言を表 1 に、全体の構成図を図 1 に各々示す。

表 1: システム緒言

PC	Libretto 100 (東芝, MMX Pentium 166MHz, 32MB, 950g)
RC カー	Clod Buster (田宮模型, デジタルプロポーショナル方式)
CCD カメラ	Power Shot (Canon, 27 万画素)

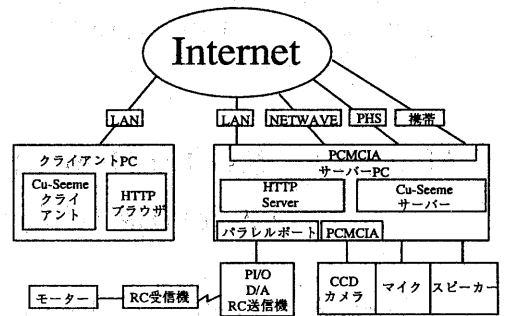


図 1: システム構成図



図 2: 外見図

### 2.2 制御回路

RC カーの制御回路には、実装を低コストに押さえることと汎用の部品を利用できる様にするため、極力本来の RC カーのものを利用した。通常の RC カー

には前後と左右の2系統のモーターがあり、各々RC送信機(プロポ)の操縦スティックの傾きに連動する。操縦スティックの傾きは、可変抵抗を介して電圧値に変換され、本体に送信される。そこで、PCからこの電圧値をプロポ送信機に直接入力することで走行部には改良を加えることなくコンピュータ制御を実現することとした。

PCからのデジタル制御信号はパラレルポートを経由して取出し、ノイズ防止を兼ねたフォトカプラによる電圧値変換を行い、D/A変換してプロポ送信機に入力する。本システムでは、パラレルポートからの8ビットのデジタル信号を前後3ビット左右3ビットに割当て、その出力信号の組み合わせによってモータのトルクやタイヤの左右角度を制御している。

ただし、D/A変換されたデジタル値に線形な制御信号に対して、RCカーの前後モータの駆動には特殊な非線形性があり、安定点を求めてチューニングを繰り返す必要があった。スティックの傾きに連動する電圧値  $E$  に対する前後モーターへの電流  $I$  の変化を図3に示す。この電圧域を3ビットの信号によって8つの電圧値に量子化して用いる。ただし、左右の特性は

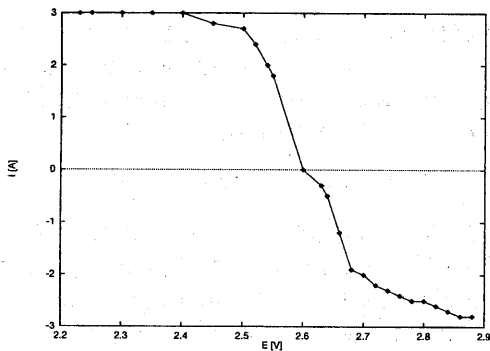


図3: 前後モータ特性

この限りでない。プロポ送信機への入力電圧に対する前後輪(4WD)の角度を図4に示す。

### 2.3 ファームウェア

操縦部と制御部の通信には、TCP/IP上のHTTPプロトコルと電子会議システムCu-SeeMe Ver.3.1.1の独自プロトコルを用いた。従って、データリンク層が無線LANやPHSに置き換わっても影響を受けない。Cu-SeeMeはpeer-to-peerの関係だが、HTTPは、操縦側がクライアント(ブラウザ)、ラジコン側

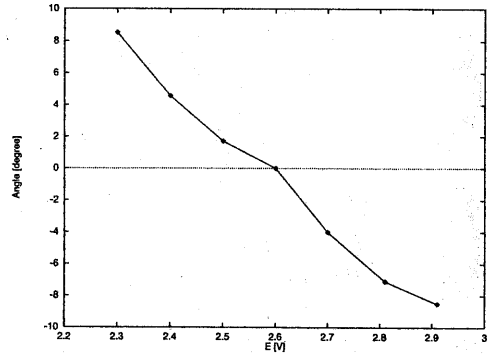


図4: 左右モータ特性

がサーバとなる。パラレルポートの制御プログラムやHTTPサーバには、OmniServer Ver2.0b1を、ブラウザにはInternet Explorer 3.0を利用した。

### 2.4 通信プロトコルとユーザインターフェース

操縦部のユーザインターフェースを図6に示す。前進や停止のボタンが、制御信号と時間の組のコマンド列に対応しており、POSTメソッドに従って符号化し送信する。これで原理的には、通常と同じようにRCカーの操縦が出来るのだが、実際には通信路によっては遅延が無視できないほど大きくなる場合があり、リアルタイムな対話性は望めない。そこで、制御信号にその出力を継続する時間を指定することとした。8ビットの制御信号を  $x_i$ 、出力時間を  $t_i$  [ms] とし、その組

$$a_i = \langle x_i, t_i \rangle$$

をアクションと呼ぶ。単一のアクション呼出しの他に、複数のアクションを連ねた

$$A = (a_1, \dots, a_n, \langle 0, 0 \rangle)$$

というアクション列をサポートしている。アクション列の終端は  $\langle 0, 0 \rangle$  を指定する。アクションはCGIコマンド側で最後に停止信号を挿入する(ただし、モータへの電流の供給が止るだけでブレーキではない)。

制御信号はLSBから3ビットが前後モータへの信号、4ビット目から3ビットが左右モータへの信号に割当てられており、16進数で指定していきされる。この組み合わせの中から表2に示す基本制御信号を選んだ。

表 2: 基本制御信号

$x_i$	アクション
30	後退
10	左後退
40	右後退
32	停止
13	左前進
33	前進
43	右前進

HTML でアクションを定義する例を図 5 に示す。実行するアクション列は value タグで指定されている「右前方に小回り」である。target タグは、CGI コマンドのレスポンスを別のフレーム (dummy) へ出力することを指定しており、これによりページのイメージが維持され、アクションの連続した操作が実現する。

```
<form method="post" action=
  "/cgi-bin/outlist.exe" target="dummy">
<input type="hidden" name="data"
  value="43 500 42 500 0 0">
<input type="image" src="FR.gif">
</form>
```

図 5: 右前進を行う HTML の例

Cu-SeeMe を加えたユーザインターフェースの全景を図 6 に示す。操作用の Web page では、車の絵の停止ボタンを中心に前後左右の移動ボタンが配置されている。加えて、ジグザグ走行や回転運動のボタンも用意している。

### 3 評価

本節では、通信品質の違いによる操作性の評価について述べる。まず、通信路の遅延と帯域評価を測定し、次に操作性を定量的に評価するための実験方法を述べる。

#### 3.1 帯域と遅延の評価

本実験では、LAN (Ethernet, 10Mbps), 無線 LAN (Xircom 社 WaveLan, 1Mbps), PHS (DDI, 32kbps),

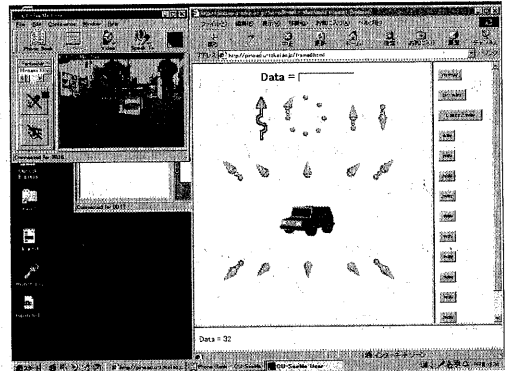


図 6: 操縦側のユーザインターフェース

携帯電話 (Docomo 1.5GHz, 9600bps) の 4 つを取り扱う。

通信路の帯域と伝送遅延の測定には、Van Jacobson によって提案されている測定ツール pathchar [6, 5] の原理を用いた。パケット長  $s$  のパケットを長さ  $l$ , 帯域  $B$  の通信路で往復させたとき、

$$T(s) = 2s/B + 2s_{ICMP}/B + 2l/c + f$$

の時間がかかる。ここで、 $c$  は光速、 $f$  はルータでのオーバーヘッド、 $s_{ICMP}$  は ICMP 'echo' の固定長部分の大きさである。よって、サイズ  $s_1$  と  $s_2$  の 2 種類のパケットについての RTT の差

$$T(s_2) - T(s_1) = 2(s_2 - s_1)/B$$

を求めれば、固定長部分は消去されて  $B$  のみが測定できる。また、 $f \approx 0$  とみなして、 $T(0)/2 - s_{ICMP}/B$  を計算すれば、それが伝送遅延  $d = l/c$  である。

実際には、競合する他のパケットの影響を受けるので、一定期間測定した値の中で最小のものをフィルタリングする必要がある。また、pathchar では多段に結合された異なる帯域を逐次的に計算していく機能があるが、今回は 1 ホップの通信路に限定することで単純化している。実際の測定には、Sun OS の ping コマンドを用い、 $s = 100, 200, \dots, 1000$  の各々を 100 回づつ繰り返して最小値を取った。各々の測定結果を図 7 と 8 に示す。この結果に最小自乗法を適用して算出した帯域と遅延を表 3 にまとめる。

#### 3.2 操作性の評価実験

通信路の帯域と通信遅延が RC カーの操作性に及ぼす影響を定量的に測定する次の走行実験を行った。

表 3: 通信品質の測定値

	LAN	無線 LAN	PHS	携帯電話
定格 [kbps]	10000	1000	32	9.6
帯域 [kbps]	10560	512.6	29.28	20.54
伝送遅延 [ms]	0.3333	4.267	162.1	224

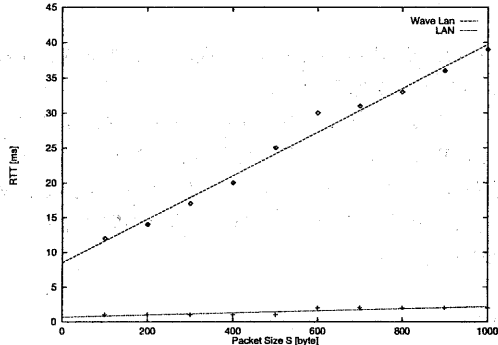


図 7: LAN と無線 LAN の RTT

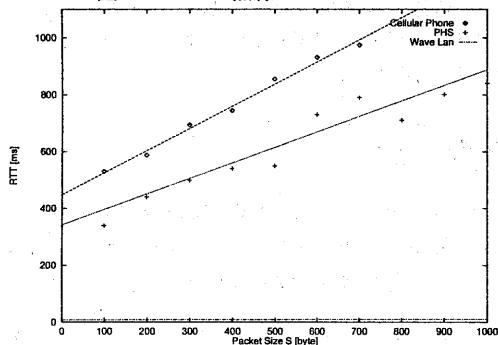


図 8: PHS と携帯電話の RTT

被験者が実験車を遠隔制御して、ポール幅 7m78cm のコースを 8 の字に走行するのに要する経過時間とアクション回数を測定する。被験者の熟練度が関係してくるので、3名の同程度の熟練者間で経過時間を競うこととした。通信路の影響を客観的に見るために、測定はネットワークの混雑の影響を受けない時間帯を選び、アクションの終了を操縦側の画面で確認する前に次のアクションを送る、いわゆる「みなし運転」は禁じた。実験で用いた CU-SeeMe の各種設定を表 4 に示す。これらの設定は、最も帯域の狭い携帯電話で接続したとき操作ができる最低の基準から選んだ。

こうして測定した実験結果を表 5 にまとめる。各々の通信路について 2 回づつ測定を行い、よい方のデー

タを取っている。この結果を各々の帯域における単位時間あたりのアクション数に換算し、図 9 に示す。

表 4: 実験時の CU-SeeMe の設定

音声	停止
動画形式	Cornell CU-SeeMe Gray
画質	白黒, 160x120 の 20%
送信レート	測定帯域の 80% で調整
送受形式	一方

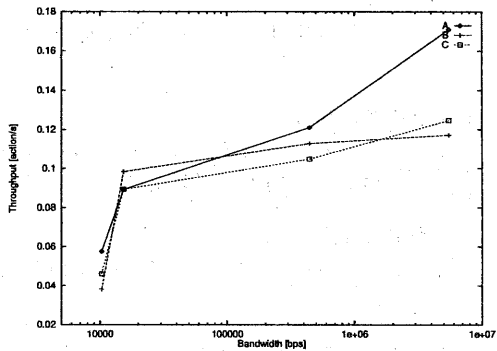


図 9: 各帯域における操作性

## 4 考察

本実験を通して通信路の帯域が操作性に大きく影響していることが示された。1 ラウンドあたりのアクション数は、ほぼ一定であり、帯域に反比例して時間がかかっているため、1 アクションは画像の転送に大部分が費やされていることがわかる。ただし、単純に帯域に比例するわけではなく、特定帯域以下では極端に操作性が落ちることもある。特に携帯電話の場合は画像の転送に 20 秒程度かかり、もはやリアルタイムな操作は望めない。被験者によると、遠隔操縦には少なくとも 32kbps 以上の帯域が必要であるという。

操作性を決めている最も支配的な要因は帯域であるが、他の通信品質やハードウェアも何らかの影響を

表 5: 操作性実験結果

被験者	LAN		無線 LAN		PHS		携帯電話	
	時間	回数	時間	回数	時間	回数	時間	回数
A	01:57.0	20	02:28.7	18	03:10.4	17	06:22.4	22
B	02:59.2	21	02:39.5	18	03:23.3	20	11:48.4	27
C	02:56.4	22	03:01.2	19	03:21.5	18	10:08.6	28

与えていることが予想される。本実験システムで想定される要因には次のような種類がある。

- 他の通信品質の要因  
伝送遅延, MTU, 輻輳, jitter, パケット損失
- ハード的な要因  
走行系の安定性, 電池の残量, ノイズの発生, 環境の変動 (明るさ等)
- ユーザインターフェースの要因  
アクションの種類, ページの設計, ポインティングデバイスの選択
- 計算機側の要因  
ブラウザやサーバの処理による遅延, OS でのマルチプロセスの不均等, 計算機パワーの不足
- 被験者の要因  
走行戦略の決定, カメラの視野からの状況判断, 思考時間,

これらの様々な条件が複雑に絡み合い, 操作性が決定されている。操作性を向上させるためには, 従って, これらの要因からボトルネックを同定し, それを解消する技術改良が必要である。そのためには, 典型的な4種類の通信路の他にも, 人工的に遅延やパケット損失を引き起こして評価をすることが効果的と考えられる。

## 5 終わりに

IP ネットワーク経由で RC カーを遠隔操作するシステムを開発し, 通信品質に対する操作性などの評価を行った。その結果, 操作性を最も決定つけるのは通信路の帯域であり, 本実験の範囲である 10Mbps までの帯域では広い帯域ほど操作性が向上することが示された。その一方で, 携帯電話程度の帯域では極端に操作性が落ち, 遠隔操作が困難であることが明らかに

なった。操作性を与えるよりの確なモデルを構築することを今後の課題とする。

本実装システムでは, 操作インターフェイスに通信の Web ブラウザを用いており, インターネットに繋がっているところであれば, どこからでも操縦出来る。この簡易性を生かした新しい応用が開けるものと期待している。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたって, 卒業研究として実験装置製作, 実験実行などに従事し, 多大な協力を頂いた東海大学工学部電気工学科 佐々木 辰則氏, 山下 啓太氏に深謝する。

## 参考文献

- [1] R. Braden, Ed., et.al., Rsource ReSerVation Protocol (RSVP) - Version 1 Functional Specification, RFC-2205, 1997
- [2] 村井, コミュニケーションネットワーク論, <http://www.sfc.wide.ad.jp/soi/class/98007>
- [3] 水野他, ネットワーク新世紀, 日経コミュニケーション, 1月14日号, pp. 42-67, 1999
- [4] 浅田, ロボカップによる認知ロボティクス, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No.1, pp.34-37, 1999
- [5] 岡田, 住本, 谷口, 「インターネットの測定 第2回 ネットワークの中身が見える」, bit, vol.30, No.8, pp.51-58, 1998
- [6] Van Jacobson, "pathchar - a tool to infer characteristics of Internet pathes," MSRI, 1997, (<ftp://ftp.ee.lbl.gov/pathchar/msri-talk.pdf>)