Vol.2013-DPS-154 No.34
Vol.2013-CSEC-60 No.34
2013/3/15

ロボットによる遠隔キャンパス案内サービスにおける操作性向上手法の提案

木田 貴章[1,a)]　楠 俊行[1]　島田 哲也[1]　土屋 陽介[1]　成田 雅彦[1]　加藤 由花[1]

概要：近年，インターネットとロボットサービスの融合が進み，ロボットを遠隔で操作するサービスが数多く提案されている．通常，遠隔操作にはロボットや遠隔地に設置されたカメラ画像を利用するが，ネットワーク状態の変化が送信画像の品質を劣化させ，ロボットの操作性に影響を与えることが指摘されてきた．本稿では，ロボットを用いた遠隔キャンパス案内サービスを対象に，送信されるカメラ画像の品質を，ネットワーク状況に応じて動的に調整する手法を提案する．

1. はじめに

近年，インターネットとロボットサービスの融合が進み，ロボットを遠隔で操作するサービスが多数提案されている [1][2]．通常，遠隔操作にはロボットや遠隔地に設置されたカメラ画像を利用するが，ネットワーク状態の変化が送信画像の品質を劣化させ，ロボットの操作性に影響を与えることが指摘されてきた [3]．

本稿では，ロボットをインターネット環境に接続するためのプロトコル仕様である RSNP（Robot Service Network Protocol）[4][5] を利用した，ロボットによる遠隔キャンパス案内サービス ROCS（Remote Open Campus System）[6] を対象に，送信されるカメラ画像の品質を，ネットワークの状況に応じて動的に調整する手法を提案する．

2. Remote Open Campus System

2.1 システムの概要

まず，本稿で考察対象とする ROCS について，その概要を説明する．ROCS は，ユーザが遠隔地からインターネット上のサーバにアクセスし，大学などのキャンパスに設置されたロボットを通じて，仮想的にキャンパスツアーを体験するシステムである．ロボットとサーバを RSNP で事前接続し，利用者が自宅など遠隔からブラウザでその状況を把握し，ロボットの操作を行う．システムの全体構成を**図 1** に示す．システムは，カメラを搭載したクライアント（ロボット）とサーバ（インターネット上の Web サーバ）および利用者端末（Web ブラウザ）で構成される．ROCS の

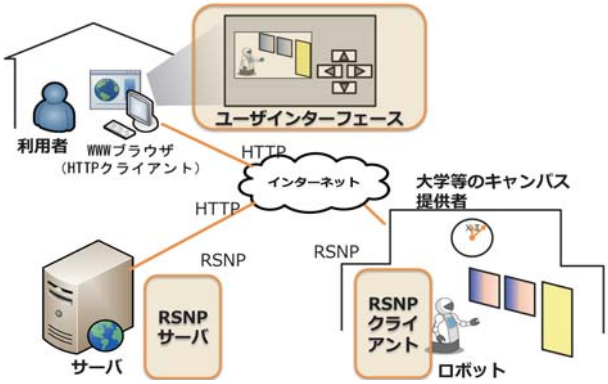


図 1　システムの構成
Fig. 1　System architecture of ROCS.

構築にあたっては，以下の 2 つの設計指針を策定している．

- サービス提供者毎の様々な環境に適用できるような汎用的なサービスであること
- ロボットの専門家ではなく，地理的な前提知識も持たないユーザでも，直感的な操作によってストレスなく操作可能であること

2.2 ロボットとサーバ間の通信

ROCS では，ロボットとサーバ間の通信に RSNP を利用する．RSNP は業界団体 RSi（Robot Service initiative）[7] により仕様化されているが，RSi では，ロボットサービスを，ネットワークを介してロボットが提供する情報サービス，もしくは物理的なサービスと定義している．**図 2** にモデルの概要を示す．このモデルは，ロボットやサービスプロバイダ，サービスポータル，ユーザなどから構成され，同期・非同期の通信による動作や動作パターンの指示や結果の取り出し，ロボットからプロバイダへの問い合わせ・

[1] 産業技術大学院大学
1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-Ku, Tokyo 101–0062, Japan
[a)] a1114tk@aiit.ac.jp

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-DPS-154 No.34
Vol.2013-CSEC-60 No.34
2013/3/15

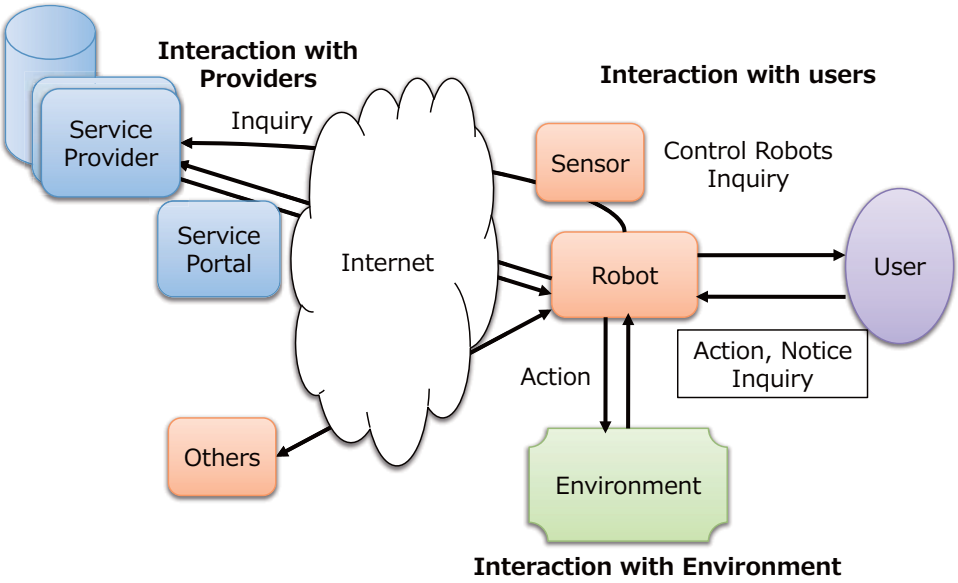


図 2 RSi のロボットサービスモデル
Fig. 2 The robot service model on RSi.

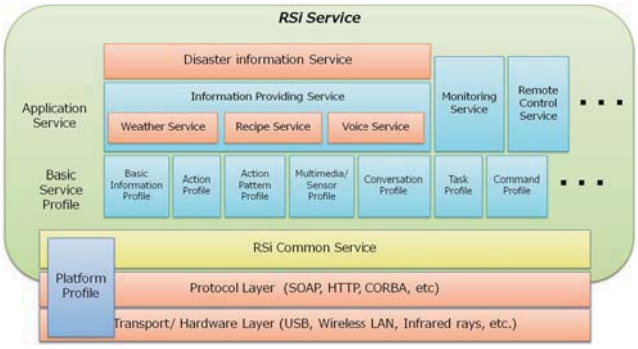


図 3 RSNP のシステムアーキテクチャ
Fig. 3 System architecture of RSNP.

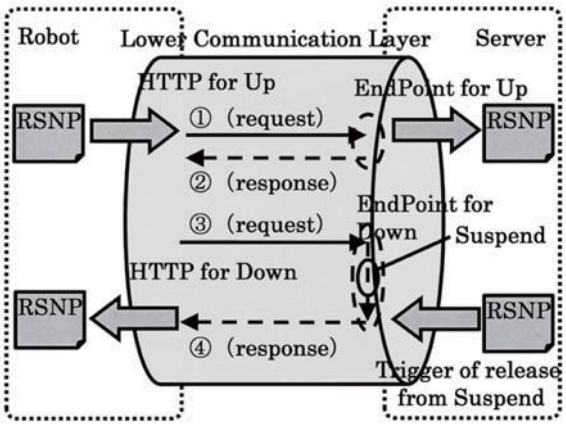


図 4 RSNP2.3 におけるロボットサービス開発環境
Fig. 4 Robot Service Development Environemnt on RSNP2.3.

通知，サービスの提供，ユーザを含む外界とのやり取りを行うことができる．

RSNP は，このモデルに従ってサービスのプロトコルを規定しており，異なるベンダで独立して開発したロボット/サービスの間での相互運用が可能である．RSNP のシステムアーキテクチャを**図 3** に示す．プラットフォームのベースは，インターネットやシステム構築向け通信基盤である Web サービス基盤を利用している．そのため，高信頼メッセージング機能，セキュリティ機能等，インターネットとの整合性の高い標準化された機能を利用可能である．

RSNP 準拠のライブラリ実装としては，富士通研究所で開発された FJLIB（Java SDK として提供）がある．これは，ロボット用 API とサーバ用 API のそれぞれに対して呼び出し側のインタフェース実装と，呼び出された側の処理を記述するためのフレームワークを提供している．サービス開発実行環境を**図 4** に示す．FJLIB では，RSNP の下位層に 2 経路の HTTP 通信を使用し，それぞれ上り方向，下り方向の通信を担っている．上り方向通信は，HTTP リクエストのペイロードにデータを入れサーバへ送信し，下り方向の通信は，HTTP レスポンスのペイロードにデータを入れロボット送信する．下り方向の通信は，迅速にデータを転送するために，Comet を使用している．ROCS はこの FJLIB を RSNP 通信に利用している．

2.3 システムの機能

次に ROCS の機能について説明する．ROCS の特徴は，ロールプレイングゲーム（RPG）の知見を活かし，現実世界に存在するロボットを，仮想世界で操作可能な対象へとマッピングを行っている点にある．RPG は，移動の仕方や探索対象の見せ方，場面遷移の仕方等に様々な特徴を持つが，ROCS では特に，操作性の向上が期待できる部分に着目し，システムの設計を行った．

具体的には，ナビゲーション情報として，各種機能により，ユーザに対してロボット周辺の環境が把握できる視点

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-DPS-154 No.34
Vol.2013-CSEC-60 No.34
2013/3/15

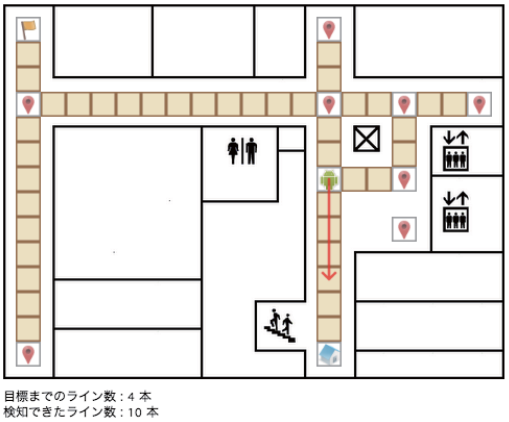


図 5 ROCS の地図のイメージ
Fig. 5 An image of the map of ROCS.

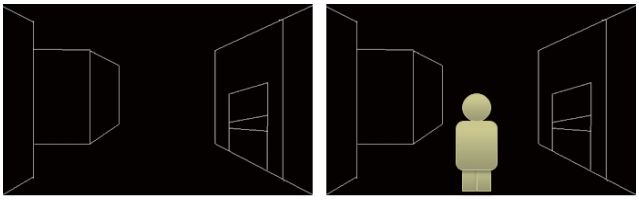


図 6 一人称視点（左）と三人称視点（右）
Fig. 6 An own view (left side) and a third party view (right side).

や地図情報を提供するとともに，各種センサから施設内を移動する上で参考となる案内情報を取得し，必要なタイミングでイベント通知を行っている．以下，ROCS の主な機能について説明する．

2.3.1 地図情報の提供

ROCS では，ロボットは地図上のマス目を双六のように進む．そのため，あらかじめ用意したフロアの二次元地図を元に，経路を直線エリアごとに区切り，その上で正方形のマス目ごとに分割する．ロボットの現在位置・姿勢をマス目に投影し，行き先として指定したマス目まで進み，それを直線の終点まで繰り返す．ROCS の地図のイメージを**図 5** に示す．地図上でのロボット操作は，RPG の大陸横断のような拠点間移動をする際に用いられる表現である．

2.3.2 カメラ画像の提供

ロボットに搭載されたカメラで撮影された映像を，ユーザに提供する機能である．ROCS では，RPG の洞窟内を探索するシーンなどで用いられる，三人称視点でアバターを操作する形式を採用している．イメージを**図 6** に示す．

2.3.3 ロボットの移動

ユーザがロボットを移動させるために使用する機能である．移動の方法は，前進，後退ボタンを用いた短距離移動と，地図上の特定位置を指定して移動する長距離移動の 2 通りを実装した．短距離移動は，ユーザが特定の場所を詳細に見学するために用い，長距離移動は，キャンパス内の特定の場所間を移動することを目的とした．画面のイメージを**図 7** に示す．



図 7 ROCS の操作画面
Fig. 7 The main window of ROCS.

2.3.4 位置情報の推定

キャンパス内を移動し，特定の位置に到達した情報を，ユーザに提供する機能である．これにより，ユーザは，カメラ画像の補助情報として，キャンパス内の現在位置を把握することができる．地図上に設置したマス目上の目印と，AR マーカを用いて位置情報を推定する．

2.3.5 イベント情報の通知

キャンパスに設置された AR マーカを読み取り，メッセージを表示する機能である．カメラ画像だけでは得られない場所の特徴や，ユーザが次に進むべき進路の情報，警告情報などをユーザに提供する．

3. 方式の提案

3.1 基本的な考え方

遠隔操作を補助するための効率的な情報提示の方法は，作業の種類に依存すると言われている．遠隔手術の場合は力覚のフィードバック，大型重機の作業の場合は精細な複数台のカメラからの映像，精密な作業の場合はフレームレートの増加などである．本稿では ROCS を対象に，適切な情報提示の方法を考察する．

ROCS において，考慮すべき次項は下記の 2 点である．

- 設計指針から，ユーザに提示される情報の種類が限定的であること
- ロボットとサーバ間の通信に RSNP を利用していることから，利用する通信の下位層が制限されていること，具体的には HTTP が利用され，マルチメディアデータは添付ファイルとして送受信される

前者については，ロボットから送信されるカメラ画像，地図上に提示されるロボットの現在位置，イベントを検知して出力されるメッセージの 3 種類の情報のみが利用される．後者については，カメラ画像はストリーム配信されず，TCP 上で添付ファイルを連続配信している．これらのことから，ROCS において遠隔操作を円滑に行うためには，インターネット経由の処理において，カメラ画像をいかに適

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-DPS-154 No.34
Vol.2013-CSEC-60 No.34
2013/3/15

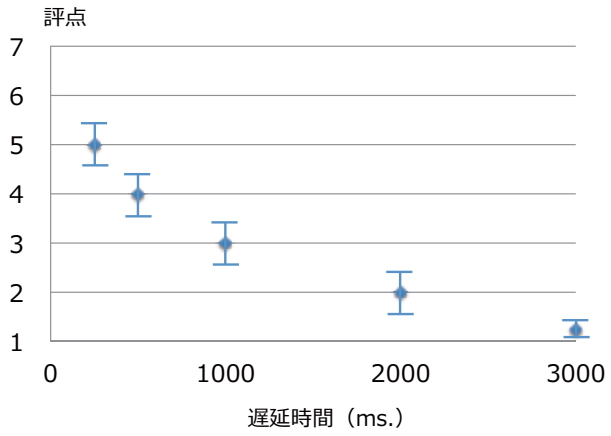


図 8 操作への遅延の影響
Fig. 8 Impact of the delay for the ROCS operation.

切にユーザに提示するかがポイントになることがわかる．

ROCS の実装においては，送信するカメラ画像の解像度，および画像の配信間隔（フレームレート）を指定することができるため，キャンパス案内に適したパラメータを選択すること，およびネットワーク状況の変化に応じて，動的に制御を行うことを目的に，制御方式の設計を行う．

後者については特に，共同研究先のベトナム国家大学（ハノイ）での ROCS の利用を想定し，TCP を利用することによる遅延の影響を考慮した方式の実現を目指した．

3.2 予備実験

まず，ROCS の遠隔操作における目標値を見積もるために，転送遅延に関する主観評価実験を行った．ROCS の設計指針である「ロボット操作の専門家ではない一般のユーザでもストレスなく操作可能であること」を考慮し，ネットワーク遅延が発生しない LAN 環境で，人為的に遅延を挿入したシステムを利用し，被験者に操作性について 7 段階で評価してもらった．画像の解像度は 320 × 240 であり，フレームレートを変更することにより，転送遅延を模擬している．被験者は，遅延が発生しない状態での ROCS 操作に熟練している 4 名である．250ms から 3000ms まで遅延時間を変動し，評点の平均値と分散を求めた．結果を**図 8** に示す．実験結果から，ROCS の遅延時間に対する適正値は 500ms. 以内と考えられるが，1000ms. までは許容範囲と判断し，転送遅延の目標値を 1000ms. と設定した．

ちなみに，画像の転送遅延に関しては，初心者と専門家ではその特性が大きく異なる．熟練者は視覚的な遅延に対応が可能であり，例えば 6 分以上の遅延が発生する惑星探査ロボットの操作であっても，熟練により対応可能と言われている．本実験は ROCS の操作に熟練している被験者によるものであるが，遅延に対する熟練はないため，一般ユーザの遅延に対する許容度を推測するには問題ないと判断した．

もう一つの事前実験として，今回想定しているサービス提供先の一つであるベトナム国家大学（VNU）と，東京間でのネットワーク遅延，および画像転送遅延時間を測定した．ここでは単純なネットワーク遅延だけではなく，RSNP によるデータの組み立て，ネットワーク遅延のスループットへの影響等が考えられる（RSNP は画像の連続転送に TCP を利用している点に注意が必要である）．

測定は，アプリケーションレイヤの処理時間に JMeter を，ネットワークの転送遅延に ping を用いて行った．実験システムの構成を**図 9** に示す．VNU 側のクライアントから，東京にある産業技術大学院大学（AIIT）のサーバを経由し，画像配信の時間およびネットワーク遅延を独立に測定している．

カメラ画像の解像度を 2 種類変化させて測定した結果を**表 1** に示す．学内を基点とした測定（図 9 の VNU の環境を学内に構築して測定）および東京内の別拠点を基点とした測定（VNU の部分を東京内の学外に構築して測定）の結果を合わせて示す．

実験結果から，ネットワーク遅延が短い場合（国内）は問題ないが，海外からのアクセスのように遅延が大きくなると，画像配信にかかる時間が急激に長くなることがわかる．RSNP では SOAP でのメッセージ組み立て等の処理時間のオーバヘッドが存在するが，これはネットワーク遅延には影響しない．主に RTT の増加による TCP のスループット低下が要因であると考えられる．この場合，遅延時間に応じてフレームレートまたは解像度を変更し，操作性に影響を与えない制御を実施する必要があることがわかる．

3.3 制御手法の提案

ROCS では RSNP（下位層は HTTP/TCP）を利用しているため，ネットワーク状態の変化に応じてカメラ画像の転送方法を変えることにより，操作性の低下を防ぐことにした．特に海外等の遠隔地からの利用において，この機能は重要な役割を果たす．

具体的には，ネットワーク状況に応じて，パケットの転送レートを変える手法を提案する．レートの変更手段としては，ROCS で実現可能な以下の 3 種類を組み合わせて実現する．

- ダミー画像の配信：キャンパス内の主なポイントで，サービス開始前に撮影しておいた画像を，ロボットの位置に合わせて配信する．これにより，画像の転送は，RSNP を介さないサーバとユーザ端末間のみの転送になるため，パケットの転送レートを大幅に削減することができる
- 解像度の変更：ROCS での操作では，カメラ画像への依存度合いが高いため，通常は 640 × 480 の解像度の画像を利用する．しかし，予備実験の結果から，転送遅延が大きい場合は許容遅延値を大幅に上回ってしま

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-DPS-154 No.34
Vol.2013-CSEC-60 No.34
2013/3/15

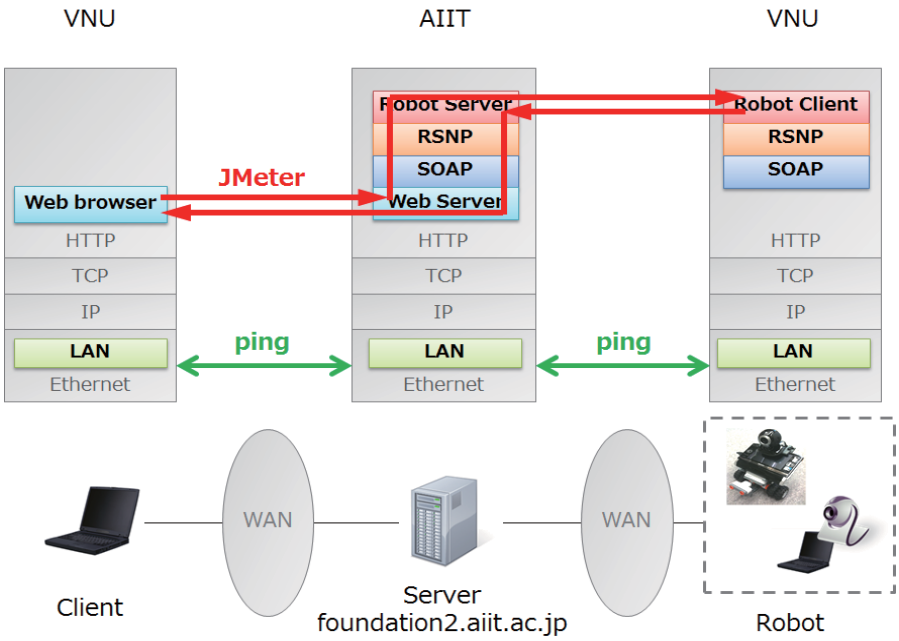


図 9 実験システムの構成
Fig. 9 System environment for the experiment.

表 1 転送遅延の測定結果
Table 1 Measurement results.

項目	プロトコル	LAN	WAN（東京）	WAN（ハノイ）
ネットワーク遅延	ICMP	1 ms.	19 ms.	325 ms.
画像配信（320 × 240）	RSNP	52 ms.	229 ms.	1172 ms.
画像配信（640 × 480）	RSNP	208 ms.	917 ms.	4690 ms.

う．そのため，ネットワーク状況に応じて，この値を動的に変更する

- フレームレートの変更：解像度の変更と合わせて，フレームレートを変更することにより，パケットの転送レート低減を実現する

ROCS では，カメラ画像の解像度は，ロボット内に実装される RSNP クライアントプログラムの中で指定され，その解像度の画像がサーバに送信される．また，フレームレートは，サービス開始時にサーバ側から指定され，以降クライアントは指定された間隔でカメラ画像をサーバに送信し続ける．そのため，サーバ側でネットワークの状況を監視し，クライアントにカメラ画像の解像度とフレームレートを通知することにした．

また，前述したとおり，ROCS には地図上の位置を指定して移動する長距離移動と，周辺状況を詳しく観察するための短距離移動が存在し，それぞれの状態に応じてカメラ画像の優先度が変わってくる．これらを考慮し，制御手法を設計した．処理の流れを以下に示す．下記の制御ロジックは全てサーバ上に実装され，リクエストを受信したクライアントロボット上で実際のパラメータ変更が行われる．

(1) 事前準備として，キャンパス内の地図の準備，マーカ準備，ロボットの準備，主なポイントでのロボットカメラでの画像撮影，撮影画像と位置情報とのマッピングを行っておく．解像度の初期値は 640 × 480 とし，フレームレートの初期値は 10fps とする
(2) ロボットがサーバに接続した時点で，ping コマンド等を利用してサーバとロボット間のネットワーク遅延 D (ms.) を測定する
(3) $D > 150$ かつ長距離移動モードのとき，ロボットに画像の配信停止を依頼し，サーバからユーザへ，ロボットの位置情報に対応したダミー映像を配信する
(4) $D > 150$ かつ短距離移動モードのとき
  (a) フレームレート F を $F = F/2$ とする（ex. 10fps → 5fps）
  (b) 画像の転送時間 T (ms.) を測定し，$T \leq 1000$ であれば処理を終了する．
  (c) $T > 1000$ かつ $F > 0.15625$ であれば (a) に戻る
  (d) $T > 1000$ かつ $F \leq 0.15625$ であれば，解像度を 1 ポイント下げる．具体的には，640 × 480 を 480 × 320 へ，480 × 320 を 320 × 240 に下げる．$T \leq 1000$ になるまでこの処理を繰り返す
  (e) $T > 1000$ であれば，$T \leq 1000$ になるまで $F = F/2$ を繰り返す
(5) それ以外の場合，$T > 1000$ であれば $F = F/2$ とする．

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-DPS-154 No.34
Vol.2013-CSEC-60 No.34
2013/3/15

$T \leq 1000$ であれば初期値のままサービスを提供する

4. 考察

今回提案した方式は，リモートキャンパス案内システムである ROCS を対象としたものだが，ロボットの遠隔操作のうち，案内サービスに分類される作業に対しては同様の手法が適用可能と考えられる．ロボットを遠隔操作する場合，操作命令に対する遅延の影響は大きいが，監視用カメラ画像に関しては，1 秒程度の遅延は許容され，リアルタイム性への要求はそれほど高いわけではない．一方，作業の目的である案内に関わる機能として，画像の解像度への要求は高いと思われる．具体的には，インターネット経由であっても VGA（640 × 480）程度の解像度が必要であろう．このような考えの下，提案手法では，パケット転送レートを削減するために，まずフレームレートを下げることで対応し，それでも要求が満たされない場合のみ解像度を下げる方式を採用した．その有効性については今後の評価が必要であろう．

前述したとおり，遠隔操作では，必要とされる情報は作業の内容に依存する．そのため，アプリケーションやサービスによって制御手法を容易にカスタマイズできる仕組みの実現も望まれる．

5. おわりに

本稿では，インターネットを介したロボット遠隔操作サービスである ROCS を対象に，ネットワーク状況に応じてカメラ画像の品質を変化させることにより，操作性を向上させる手法の提案を行った．今後，提案手法を ROCS に実装し，有効性の検証を行う予定である．

謝辞 本研究を進めるにあたり，（株）富士通研究所の神田真司様，岡林桂樹様，村川賀彦様から貴重なご意見を頂きました．ここに感謝の意を表します．

参考文献

[1] 横小路泰義：テレロボティクスフロンティア，日本ロボット学会誌， Vol. 30, No. 6, pp. 562–564 (2012).
[2] Tachi, S.: *Telexistence*, World Scientific Publishing Company (2009).
[3] 立松綾乃，石橋　豊，福嶋慶繁，菅原真司：力覚メディア・サウンド・ビデオ伝送におけるネットワーク遅延とその揺らぎの影響，映像情報メディア学会誌， Vol. 64, No. 12, pp. 1873–1883 (2010).
[4] 成田雅彦，村川賀彦，植木美和，中本啓之，平野線治，蔵田英之，加藤由花：普及期のロボットサービス基盤を目指す RSNP（Robot Service Network Protocol）2.0 の開発，日本ロボット学会誌， Vol. 27, No. 8, pp. 857–867 (2009).
[5] 成田雅彦，村川賀彦，植木美和，岡林桂樹，秋口忠三，日浦亮太，蔵田英之，加藤由花：インターネットを活用したロボットサービスの実現と開発を支援する RSi（Robot Service Initiative）の取り組み，日本ロボット学会誌， Vol. 28, No. 7, pp. 829–840 (2010).
[6] 高橋雅彦，野本悠太，伊藤由佳，土屋陽介，成田雅彦，加藤由花：ロボットの遠隔操作による RPG 風キャンパス体験サービスの提案，情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会, DPS154，pp. 1–6 (2013).
[7] RSi Robot Service initiative: http://robotservices.org/.

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan