九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

日本-タイ遠隔手術実験

荒田, 純平
名古屋工業大学

高橋, 弘樹
東京大学

割澤, 伸一
東京大学

田上, 和夫
九州大学

他

https://hdl.handle.net/2324/8519

出版情報：日本ロボット学会学術講演会予稿集. 24, 2006-09. The Robotics Society of Japan
バージョン：
権利関係：

日本－タイ遠隔手術実験

○ 荒田純平 (名工大) 高橋弘樹 (東大) 割澤伸一 (東大) 田上和夫 (九大) 小西晃造 (九大)
家入里志 (九大) 清水周次 (九大) 中島直樹 (九大) 岡村耕二 (九大) 藤野雄一 (NTT)
上田幸宏 (NTT コム) Pornarong CHOTIWAN(Chulalongkorn Univ.)
橋爪誠 (九大) 光石衛 (東大)

A remote surgery experiment between Japan-Thailand

*Jumpei ARATA, Hiroki TAKAHASHI†, Shin'ichi WARISAWA†, Kazuo TANOUE‡, Kozo KONISHI‡, Satoshi IEIRI‡, Shuji SHIMIZU‡, Naoki NAKASHIMA‡, Koji OKAMURA‡, Yuichi FUJINO‡‡, Yukihiro UEDA‡‡†, Pornarong CHOTIWAN‡†, Makoto HASHIZUME‡ and Mamoru MITSUISHI†

Nagoya Institute of Technology, † The University of Tokyo, ‡ Kyushu University,
‡† Chulalongkorn University, ‡‡ NTT, ‡‡† NTT Communications

Abstract—In this paper, a remote surgery experiment, which was conducted between Japan and Thailand by using the developed minimally surgical system is described. In the experiment, a laparoscopic cholecystectomy was successfully performed on a pig. Various network measurments were conducted for the evaluation of the remote surgery.

1. はじめに

ネットワークを介した遠隔手術検証のため，日本－タイを結ぶ遠隔手術実験として，低侵襲手術支援システムを用いた，ブタを対象とする腹腔鏡下胆嚢摘出術を行った．

本研究ではこれまで，4 回にわたり東京－静岡（直線距離約 150km）を結ぶブタを対象とした腹腔鏡下胆嚢摘出術手術実験を行った．これらの遠隔手術実験においては既存の情報通信設備を使用することを想定し，国内の病院等施設に広く普及している ISDN(2B+D), ISDN(23B+D) 回線を用いた．ロボット位置信号の伝送時間遅れは 50msec，また映像伝送時間遅れは 400msec 程度であった．また 2005 年 3 月には，日本－韓国を結ぶ学術研究用インターネットを使用し，遠隔手術実験を行った．この実験では，日本－韓国間を結ぶ回線として，福岡と釜山を結ぶ光海底ケーブル KJCN(Korea-Japan Cable Network) で構成された，日韓インターネット・テストベッド APII(Asia-Pacific Information Infrastructure) を使用した．実験では，ロボット動作情報に加え，映像を DV 品質で 4 系統伝送した．伝送時間遅れはロボット動作情報伝送において 6.5msec，映像伝送において 435msec であった．

本報告では，今回の日本－タイ遠隔手術実験で得られたデータを示し，また上記の過去に行われた実験結果との比較検証を行う．

2. 実験目的

本実験では，日本－タイを結ぶ学術研究用テストベッドネットワーク Japan Gigabit Network II (JGNII) を介して情報伝送を行い，情報伝送により生ずる伝送時間遅れの影響等を調べた．これにより，過去の実験結果との比較検証を行い，遠隔手術実現のための知見を得ることが本実験の目的である．

3. 低侵襲手術支援システム

低侵襲手術支援システムは，2 つのサイト (場所) により構成される．オーペレーション・サイトは，執刀医が存在し，操作を行う場所であり，また，サージェリ・サイトは，患者が存在し，実際の手術が行われる場所である．これらの 2 つのサイトは LAN による接続，または ATM，ISDN 等，様々な回線種別により接続可能であり，ロボット制御信号，映像，音声等が伝送される．マスタ・マニピュレータ，スレーブ・マニピュレータは VxWorks を用いて実時間制御され，内部制御周波数を 1kHz としている．マスタ・スレーブ間の制御情報通信手法はネットワーク構成によって変更可能である．

Fig.1 Master manipulator

Fig.2 Slave manipulator

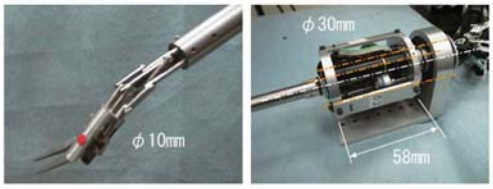

Fig.3 Link driven multiple d.o.f. forceps

4. 実験方法

本実験では，下記の実験システム構成のもと，低侵襲手術支援システムによるブタを対象とした腹腔鏡下胆嚢摘出術を行った．

4·1 実験施設

実験施設として，医師がロボットを操作するオペレーション・サイトをチュラロンコン大学 (Department of Social and Preventive Medicine, Faculty of Medicine, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand)，また実際に手術が行われるサージェリ・サイトを九州大学 (Center for the Integration of Advanced Medicine and Innovative Technology (CAMIT), Kyushu University, Maidashi 34-1, Higashi-ku, Fukuoka city, Japan) として実験を行った．両サイト間の直線距離は約 3700km である．

4·2 ネットワーク構成

本実験で用いたネットワーク回線構成を Fig.4 に示す．ネットワーク伝送経路は，九州大学から学内 LAN (KITE: Kyushu University Integrated Information Transmission Environment) を経由し，タイ－日本間における光ファイバ回線による学術研究用テストベッドネットワーク Japan Gigabit Network II (JGNII) へ乗り入れる．JGNII はタイ国内基幹学術ネットワーク ThaiSARN (Thai Social/Scientific Academic and Research Network) へ接続されており，大学間ネットワーク UniNet (Inter-University Network) を介してチュラロンコン大学へ情報伝送が行われた．

4·3 ロボット動作指令伝送

ロボット動作情報においては，UDP/IP ネイティブ・ソケットによる通信を確立した．低侵襲手術支援システムのマスタ・スレーブ間の通信として，マスタ側リアルタイム・コントローラより，スレーブ側リアルタイム・コントローラへ 10Hz の周期で位置情報が伝送された．一般的に UDP/IP は通信保証を行わないため，TCP/IP と比較して信頼性に劣る．そこで，スレーブでの動作パケット受信時について，下記の条件に適合した場合，パケットを棄却する処理を行うよう制御器を設定した．

- 動作指令パケット送受信における順序逆転
- 1kHz の制御ループ中に複数のパケット受信
- 受信パケットサイズ異常
- パケットデータ異常

4·4 映像・音声伝送

伝送された映像・音声はオペレーション・サイトからサージェリ・サイトへ術者の操作状況映像が 1 系統，また逆方向へは内視鏡映像，また手術室環境映像の 2 系統が UDP/IP により伝送された (Table.1)．本実験では，新興光器社製立体視腹腔鏡を低侵襲手術支援システムへ組み込み，左右眼映像をコンポジットで 1 系統として伝送し，オペレーション・サイトにおいて 3 次元映像として合成した後，操作者へ提示を行った．左右眼映像は NTSC インタレース映像において奇/偶数フレームに分割されているため，伝送可能な映像解像度は 720 × 240 となる．内視鏡映像伝送手法として，ハードウェア MPEG2 CODEC を使用し，エンコーダとして NTT エレクトロニクス社製 RU1000E，デコーダとして同社製 RR1000D を使用した．このとき，より低遅延性を高めた同社で開発された MPEG2 エンコーダである MP2000 を切替により排他利用できるよう設定を行った．MP2000 は，超低遅延動作可能な MPEG2 エンコーダボード (SC2010E:NEL 社製) を CSR 社製 IP 通信モジュールと組み合わせて構成したものである．また，別途 1 系統，上記 RU1000E/RR1000D によって術者と手術室とのコミュニケーションを行った．

Table 1 Data transfer bandwidth

Image	Bandwidth
From surgery site to operation site:	
Communication	4Mbps
Laparoscope	4Mbps
Robot control	5 kbps
Visual Phone	128 kbps
From operation site to surgery site:	
Communication	4Mbps
Visual Phone	128 kbps
Total	10.3 Mbps

5. 実験結果・考察

日本－タイを結ぶ学術研究用テストベッドネットワークを介して低侵襲手術支援システムにより，ブタを対象とした腹腔鏡下胆嚢摘出術を行うことに成功した．手術に要した時間は約 1 時間半程度であり，従来の腹腔鏡化胆嚢摘出術とほぼ同等の時間で手術は可能であった．

Fig.5 Operation site (Chulalongkorn Univ.)

Fig.6 Surgery site (Kyushu Univ.)

5·1 ロボット動作指令伝送時間遅れ

ping による Round-trip time の測定より，124.7msec の伝送時間遅れがロボットとほぼ同じパケットサイズで発生していたことが確認された．実際にロボット動作指令を伝送したプロトコルは UDP/IP であるが，ICMP での測定結果を指標とすると，マスタ・スレーブ間における位置指令は約 62.4msec で到達していたと考えられる．これまでの遠隔手術実験結果との比較を表に示す (Table2)．

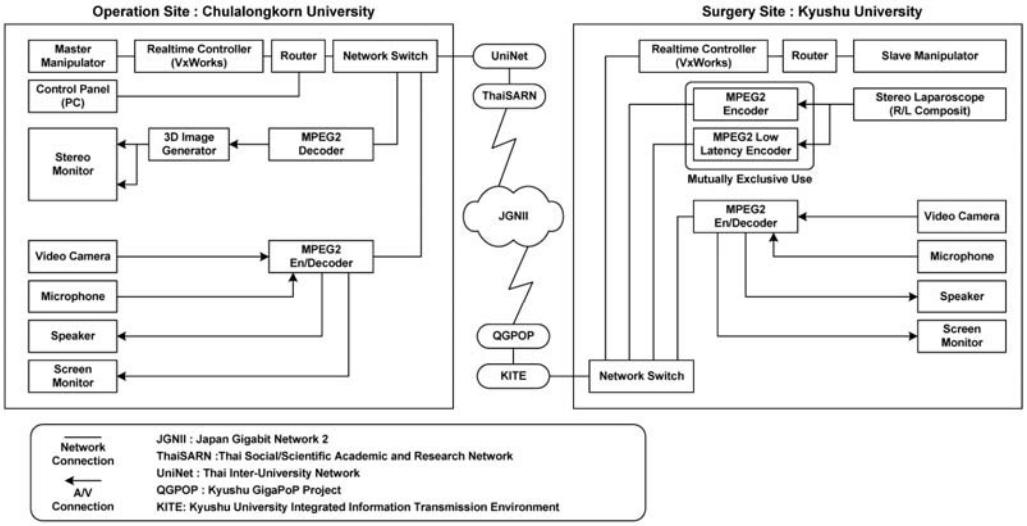

Fig.4 Overview of the network configuration

Table 2 Network time delay by ping (Round-trip)

Network	Used bandwidth	Op. site - Surg. site	Distance	Hop	Time-delay
ISDN(2B+D)	256 kbps	Tokyo - Shizuoka	150 km	-	99.8 msec
ISDN(23B+D)	1472 kbps	Tokyo - Shizuoka	150 km	-	35.6 msec
R & D Internet (APII)	50 Mbps	Seoul - Fukuoka	540 km	14	13.0 msec
R & D Internet (JGNII)	10.3 Mbps	Bangkok - Fukuoka	3700 km	15	124.7 msec

TCP/IP vs UDP/IP

TCP/IP による通信を行った場合，輻輳の影響により帯域が圧迫され，十分な通信品質が得られない場合が存在する．本実験構成で実際に TCP/IP によりロボット動作指令伝送を行ったところ，動作指令パケットが不均一な伝送時間遅れを伴ってスレーブに到達し，結果として操作を行うことが困難であった．よって本実験では，この不均一な動作時間遅れを解決するため，UDP/IP による通信を行った．スレーブの動作指令パケット受信において，パケット到着時間間隔を時系列で示したグラフを TCP/IP，UDP/IP それぞれについて示す (Fig.7,8)．マスタからスレーブへは 10Hz でロボット動作指令パケットを送信しているため，受信は 100msec 間隔で行われることが望ましい．実験結果より，TCP/IP はパケット到着時間間隔に大きなばらつきが存在し，複数のパケットがほぼ同時に到着するケースが確認された．一方，UDP/IP についてはパケット到着時間間隔に大きなばらつきが無く，ほぼ 100msec での受信が可能であった．測定結果中，パケット到着時間間隔が 200msec となっているのは，パケット損失を示している．

TCP/IP は通信保証を行うため，輻輳が発生した際には，本実験の様に遠隔手術のような高いリアルタイム性を必要とするアプリケーションには適用が困難となる．これに対し，UDP/IP は通信保証は行わない一方，輻輳が生じないため，今回の実験構成では良好な結果を得たと考えられる．しかしながら，UDP/IP は先に述べたように通信保証を行わないため，一般的に TCP/IP と比較してパケット損失が生じやすい．本実験での時系列におけるパケット損失率を調べたところ，最も頻繁に生じていた時間で 0.9%程度のパケット損失が確認された．しかしながらパケット損失は Fig.8 のように分散的に発生しており，操作への大きな影響は見られなかった．

5·2 映像伝送品質

本実験ではエンコーダとして RU1000E，デコーダとして RR1000D（以下，Normal）とエンコーダとして低遅延エンコーダである MP2000，デコーダとして RR1000D（以下，Low Latency），2 種類の CODEC を排他利用できるよう設定を行った．これらは MPEG2 による CODEC であるため，過去の日本－韓国間での DVTS を用いた実験と比較すると，画面上に動きの多い場面等には映像品質には劣化が見られたものの，伝送に必要な帯域は大幅に減少した．これにより大幅な伝送距離の増加に関わらず，伝送時間遅れは短縮することが可能となった．Low Latency は Normal と比較してほぼ同じ映像品質であるものの，ブロックノイズ等が一部観察されたため，本実験では Normal の CODEC 環境を主に利用して実験を行った．しかしながら，Low Latency は通信設定条件の最適化により，映像品質，伝送遅延が改善する可能性がある．

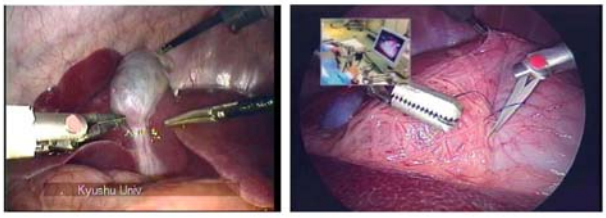

Fig.9 Comoparison of image quality (left: Japan-Thailand (Normal), Right: Japan-Korea)

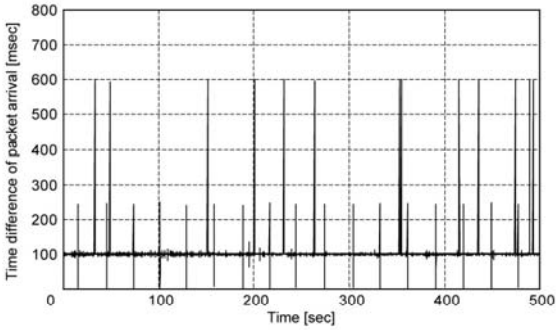

Fig.7 Time difference of packet arrival by TCP/IP

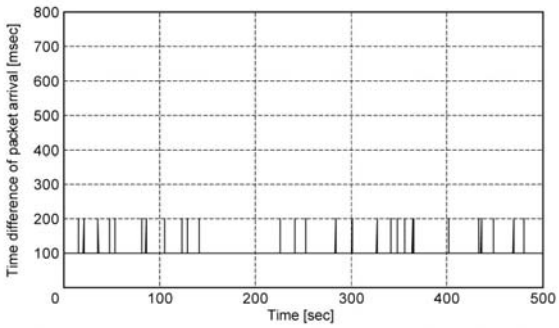

Fig.8 Time difference of packet arrival by UDP/IP

Table 3 Comparison of image time-delay (Round-trip)

Network	Op.site - Surg. site	Distance	CODEC	Bandwidth	Time-delay
ISDN(2B+D) × 2	Tokyo - Shizuoka	150 km	SONY PCS-P500	256 kbps	676.0 msec
ISDN(23B+D)	Tokyo - Shizuoka	150 km	NEC TC5000EX100	1472 kbps	785.0 msec
R & D Internet	Seoul - Fukuoka	540 km	DVTS	10 Mbps	871.0 msec
R & D Internet	Bangkok - Fukuoka	3700 km	MP2000/RR1000D	4 Mbps	1000.0 msec

5·3 映像伝送時間遅れ

ストップ・ウォッチ映像をループバックさせることにより，映像伝送時間遅れを測定した．実験結果より，Normal の往復での遅延時間は 740msec であった．また，Low Latency では 640msec であり，100msec の遅延時間改善が確認された．また，LAN 環境下での伝送時間遅れは Normal，Low Latency のそれぞれ場合について，590 msec，312msec であることから，本実験による情報伝送により生じた遅延はおおよそ 250msec 程度であったことが確認された．今回使用した CODEC とこれまでの実験との比較した表を示す (Table 3)．これらの結果は使用したネットワーク構成，CODEC，伝送した映像系統数等，条件が大きく異なるため一元的な比較はできないが，今回の実験では過去の実験と比較して，伝送距離が大幅に増加したのにもかかわらず，ほぼ同等の遅延時間でより高品質な映像を伝送することが可能であった．

5·4 操作者が体感する時間遅れ

操作者が体感する時間遅れは，マスタ・スレーブ間の送信周期，位置情報伝送時間遅れ，スレーブ・マニピュレータの機械的応答速度，マスタ・スレーブ間の映像伝送時間遅れの総和によって得られる．本実験では，582.4 msec の時間遅れを操作者は感じていたことが確認された (Table 4)．これまでの実験との比較して，ほぼ同程度の時間遅れを操作者は感じていたことがわかった．

Table 4 Sensible time delay of operator

Network	Time delay	
ISDN(2B+D) × 2	Tokyo-Shizuoka	540.0 msec
ISDN(23B+D)	Tokyo-Shizuoka	592.5 msec
APII	Seoul-Fukuoka	592.5 msec
JGNII	Bangkok-Fukuoka	712.4 msec

6. まとめ

- 日本ータイを結ぶ JGNII を用い，低侵襲手術支援によるブタを対象とした遠隔での腹腔鏡下胆嚢摘出手術に成功した．手術に要した時間は従来手法の腹腔鏡下胆嚢摘出術とほぼ同じであった．
- 本実験では，ロボット動作情報，映像を低遅延型 CODEC を用いて伝送した．往復の伝送時間遅れはロボット動作情報伝送において 124.7msec，映像伝送において 740msec であった．
- TCP/IP を用いたロボット動作指令伝送は時間遅れにばらつきを生じ，操作が困難であった．UDP/IP による伝送により安定した操作が可能となった．UDP/IP を用いる場合，本実験で示した手法のように，端末側での対処が重要となる．
- 伝送映像品質向上が望まれる．映像品質と伝送時間遅れはトレード・オフの関係にあり，今後の低遅延型映像機器開発が重要である．3 次元立体視は実用的なレベルで使用可能であった．
- 広範な遠隔手術の普及のためには，本実験で用いたようなインターネット回線による遠隔手術実現が必要と考えられる．

謝辞

本研究は，平成 17 年度総務省プロジェクト「国際情報通信ハブ形成のための高度 IT 共同実験」との連携として実施されたものである．

参考文献

[1] Jumpei Arata et al., “A remote surgery experiment between Japan-Korea using the minimally invasive surgical system,” Proc. of Int. Conf. Robotics and Automation 2006, pp.257–262, Florida, US, May. 2006.

[2] Jacques Marescaux et al., “Transatlantic robot-assisted telesurgery,” NATURE, VOL.413, 27 Sept., pp.379–380, 2001.

[3] Japan Gigabit Network 2 (JGNII)
: http://www.jgn.nict.go.jp/

[4] Asia Broadband Program (Asia-BB)
: http://www.asia-bb.net/en/index.html