

インターネットを介した遠隔制御システムの設計

On Control Design of Internet-Based Network Teleoperation System

○黒田 優一、羅 志偉、渡部 慶二、遠藤 茂

○Yuichi Kuroda, Zhi-wei Luo, Keiji Watanabe, Shigeru Endo

山形大学 大学院 理工学研究科

Yamagata University

キーワード：遠隔制御 (Teleoperation)、インターネット (Internet)、時変通信遅れ (time-varying communication delay)、リアプノフ安定性 (Lyapunov Stability)

連絡先：山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学工学部応用生命システム工学科渡部研究室
黒田 優一, Tel 0238-26-3326, E-mail yuichi@ewata.yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

遠隔制御技術は、原子力施設のような危険な環境、宇宙や深海のような極限環境、またはスクールの隔離されている巨大物や微小物を扱う環境などに応用する目的で研究されてきた。そのため、従来の遠隔操作システムの多くは、特定のロボットを特定のオペレータサイトから特定の通信伝達経路を通じて操作する1対1のシステムであった。

一方、近年、インターネットの急速な普及によって、不特定多数のユーザが任意のインターネットサイトから情報交換することが可能となり、「いつでも、どこでも、誰でも」使える情報伝達ネットワークが形成されるようになってきている。

本研究では、このような汎用回線を利用するコンピュータネットワーク環境を活用した新しい遠隔操作システム—ネットワーク遠隔制御システムの構築について考察する。この技術を開発・応用することによって、近い将来、高齢者の在宅介護や在宅診断、また新しいテレ臨場会議システムが実現できると考えられる。

ネットワーク遠隔制御システムを研究するにあたり、いくつかの重要な研究課題が挙げられる。まず、各サイトの対象の運動、音声と映像などの情報をいかにして統合処理するかである。さらに、ネットワークの負荷に応じて通信時間が不規則に変化するの、システム全体の安定性をいかにして維持するかである。これらの問題に対処するために、本研究室

では、図1に示す具体的な実験システムを構築し、実応用例を意識しながら、幅広く研究を進めている。

今回、主として時変通信遅れに対処するためのシステムの安定化設計について基礎的な考察を与える。

従来の研究では、1対1の双方向遠隔制御システムにおいて、通信遅れ時間が一定である場合の対策として、文献[1]、[2]、[3]などがシステムの受動性を満たす制御設計理論を与えている。また、通信遅れ時間が時変である場合、文献[4]の受信された信号の歪みを修正する方式や、文献[5]の送信相手のモデルを利用した受信信号の予測、また本研究で参考する文献[6]のリアプノフ安定解析を用いた手法が提案されている。しかし、いずれの研究も1対1の双方向遠隔システムを想定し、1対多や、多対多のネットワーク双方向遠隔システムについて考察されていなかった。

本研究報告は、まず本研究室で構築した実験システムについて紹介したのち、時変通信遅れに焦点を絞って、文献[6]をベースにして、ネットワーク双方向遠隔システムの安定化設計について検討する。

2. 実験システムの構成

本研究室で開発した実験システムの構成を図1に示す。このシステムは、ユーザが座る電動椅子である各クライアントと、それらを管理するサーバから構成されている。各クライアントには、通信相手からの音声や音源位置情報、映像などが呈示される。

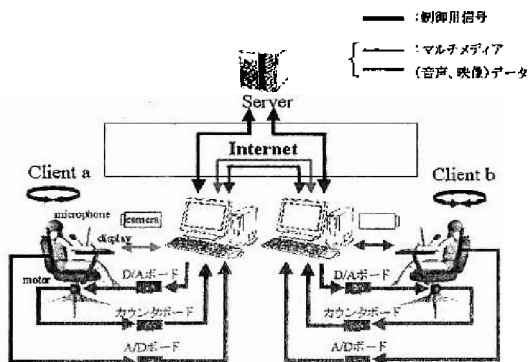


図 1. 実験システムの構成図

各椅子の背部に圧力センサが設置されていて、ユーザの力信号が A/D ボードを介し、デジタル信号に変換される。また、D/A ボードを介して、椅子を回転させる AC モータの速度制御を行う。カウンタボードを介して、モータの回転によるカウント値の増減から角度の検出を行う。モータの回転角度の情報や、ユーザの音声・映像情報は、サーバの管理に従って他のクライアントに送信し、高い臨場感を得る。

また、通信プロトコルについて、椅子の回転角度データは、TCP プロトコルを使用する。TCP プロトコルは、誤り訂正や通信の流れの制御、パケットの到達順序の制御などの機能を提供することで、信頼性の高いコネクションを提供できる。また、マルチメディア（音声・映像）データは、転送時間を短くすることができる UDP プロトコルを使用する。

システムの全てのソフトウェアは、Java 言語を用いている。Java を使う利点として、OS に依存しないこと； CGI のように応答を HTML で記述する必要はないこと； 接続を維持でき、様々なアプリケーションプロトコルを利用できること； 動的なページを構成できることなどが挙げられる。アプレットの概念を図 2 に示す。

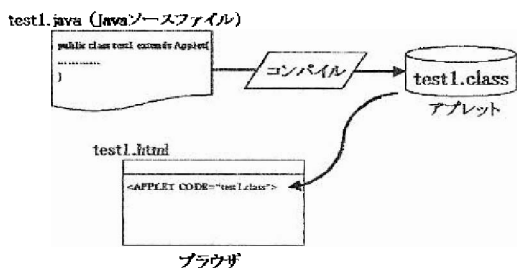


図 2. アプレットの概念

Java ソースファイルをコンパイルして作成したアプレットは、全てのマシンで使用できるように中

間コードと呼ばれるコードで出力される。これが、HTML の <APPLET> タグによりアプレットが呼び込まれ、ブラウザに組み込まれている Java インタープリタがアプレットの中間コードを解釈しながら実行していく。

3. 制御系設計

3.1 1対1テレオペレーション

文献 [6] は、1対1の位置対称型双方向遠隔制御システムについて、通信遅れが時変であるときのシステムのリアプノフ安定性解析を行っている。

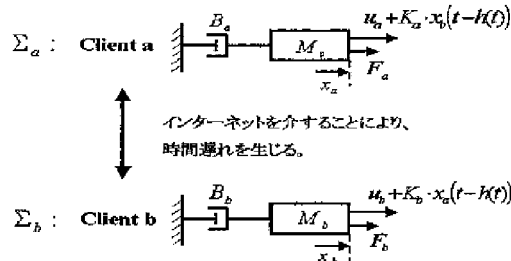


図 3. 位置対称型双方向遠隔制御システム

図 3 に示すように、 Σ_a, Σ_b の間の時間遅れを、それぞれ $T_a(t), T_b(t)$ と仮定し、平均の時間遅れを $h(t) = (T_a(t) + T_b(t)) / 2$ とすると、システムの運動方程式は、

$$\begin{aligned} \Sigma_a : M_a \ddot{x}_a + B_a \dot{x}_a &= F_a + (u_a + K_{a1} x_b(t-h(t))) \\ \Sigma_b : M_b \ddot{x}_b + B_b \dot{x}_b &= F_b + (u_b + K_{b1} x_a(t-h(t))) \end{aligned} \quad (1)$$

と表せる。ただし、

$$u_a = -K_{a2} x_a - K_{a3} \dot{x}_a, \quad u_b = -K_{b2} x_b - K_{b3} \dot{x}_b \quad (2)$$

である。

システムのブロック線図を図 4 に示す。

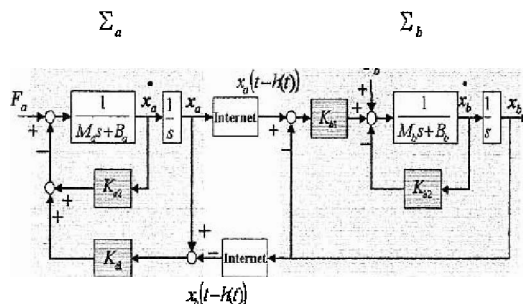


図 4. 位置対称型遠隔制御システムのブロック線図

このシステムの状態方程式は、

$$\begin{aligned} \Sigma_a: \dot{x}_a &= A_a x_a(t) + B_a u_a(t) + A_{ba} x_b(t-h(t)) \\ \Sigma_b: \dot{x}_b &= A_b x_b(t) + B_b u_b(t) + A_{ab} x_a(t-h(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

と表される。ただし、

$$\begin{aligned} A_a &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B_a}{M_a} \end{bmatrix}; & B_a &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ M_a \end{bmatrix}; & A_{ba} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K_{ba}}{M_b} & 0 \end{bmatrix} \\ A_b &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B_b}{M_b} \end{bmatrix}; & B_b &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ M_b \end{bmatrix}; & A_{ab} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K_{ab}}{M_a} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

である。

ここで、制御パラメータを設計するにあたり、以下のリアプノフ関数

$$V(x, t) = x(t)^T x(t) + \frac{1}{1-\bar{\tau}} \int_{t-h(t)}^t x(\theta)^T x(\theta) d\theta \geq 0 \quad (5)$$

を考える。ただし、 $h(t) \leq \bar{\tau} < 1$, $\forall t$ と仮定する。

式(3)の状態方程式は、

$$\dot{x}(t) = A_k x(t) + A_d x(t-h(t))$$

とまとめることができる。ただし、

$$\begin{aligned} A_k &= \begin{bmatrix} A_a - B_a K_a & 0 \\ 0 & A_b - B_b K_b \end{bmatrix} \\ A_d &= \begin{bmatrix} 0 & A_{ba} \\ A_{ab} & 0 \end{bmatrix}; & x(t) &= \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

である。

リアプノフ関数を微分し、整理すると、

$$\dot{V}(x, t) =$$

$$2x^T (A_k x + A_d x(t-h(t))) + \frac{1}{1-\bar{\tau}} x^T x - \frac{1-h(t)}{1-\bar{\tau}} x(t-h(t))^T x(t-h(t)) \quad (7)$$

となり、不等式

$$2x^T A_d x(t-h(t)) \leq x^T A_d A_d^T x + x(t-h(t))^T x(t-h(t)) \quad (8)$$

を用いると、式(7)は、

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, t) &\leq x^T \left(2A_k + A_d A_d^T + \frac{1}{1-\bar{\tau}} I_n \right) x + x(t-h(t))^T \\ &\quad \times \left[I_n - \frac{1-h(t)}{1-\bar{\tau}} I_n \right] x(t-h(t)) \end{aligned} \quad (9)$$

となる。 $\dot{V}(x, t) \leq 0$ ならば、システム全体の安定性が保証されることから、この条件を満たすには、

$$S \equiv 2A_k + A_d A_d^T + \frac{1}{1-\bar{\tau}} I_n < 0 \quad (10)$$

であればよい。一方、行列 S は、

$$\begin{aligned} S = & \begin{bmatrix} \alpha & 2 & 0 \\ -2\left(\frac{K_{a1}}{M_a}\right) & -2\left(\frac{K_{a2}+B_a}{M_a}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} \\ & - 2\left(\frac{K_{b1}}{M_b}\right) & -2\left(\frac{K_{b2}+B_b}{M_b}\right) \\ & 0 & 0 & -2\left(\frac{K_{b1}}{M_b}\right) \end{bmatrix} \\ & + \left(\frac{K_{a1}}{M_a}\right)^2 + \alpha & & + \left(\frac{K_{b1}}{M_b}\right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

と表される。行列 S を負定にするためには、行列 S の固有値のすべての実部を負にしなければならない。

ここで、行列 S がブロック対角行列であることに注目し、その左上部のブロックを、

$$S_1 = \begin{bmatrix} \alpha & 2 \\ -\xi_{11} & -\xi_{21} + \alpha \end{bmatrix}$$

ただし、

$$\xi_{11} = \frac{2K_{a1}}{M_a}; \quad \xi_{21} = 2\left(\frac{K_{a2}+B_a}{M_a}\right) - \left(\frac{K_{a1}}{M_a}\right)^2 \quad (12)$$

とおく。

ここで、特性方程式

$$\det(sI_2 - S_1) = s^2 + s(\xi_{21} - 2\alpha) + 2\xi_{11} - \alpha^2 - \xi_{21}\alpha = 0 \quad (14)$$

より、行列 S_1 の固有値が求められる。

$$\operatorname{Re}(\lambda_i(S_1)) < 0 \Leftrightarrow \begin{cases} 2\xi_{11} + \alpha^2 - \xi_{21}\alpha > 0 \\ \xi_{21} - 2\alpha > 0 \end{cases} \quad (15)$$

である。したがって、

$$\begin{aligned} &= \gamma_a \alpha \\ &> \frac{\gamma_a - 1}{2} \alpha^2; \quad \gamma_a > 2 \end{aligned} \quad (16)$$

同様に、行列 S の右下部のブロックについて、

$$S_2 = \begin{bmatrix} \alpha & 2 \\ -\xi_{12} & -\xi_{22} + \alpha \end{bmatrix} \quad (17)$$

ただし、

$$\xi_{12} = \frac{2K_{b1}}{M_b}; \quad \xi_{22} = 2 \left(\right.$$

とおく。
このとき

$$\begin{cases} \xi_{22} = \gamma_b \alpha \\ \xi_{12} > \frac{\gamma_b - 1}{2} \alpha^2; \quad \gamma_b > 2 \end{cases} \quad (19)$$

式(13),(17),(18),(19)より、システムを安定にするためには、次のように各制御パラメータを決定すればよい。

$$\begin{aligned} K_{a1} &> \frac{\gamma_a - 1}{4} M_a \alpha^2 \\ K_{a2} &> \alpha M_a + \frac{K_{a1}^2}{\gamma_a M_a} - B_a \\ K_{b1} &> \frac{\gamma_b - 1}{4} M_b \alpha^2 \\ K_{b2} &> \alpha M_b + \frac{K_{b1}^2}{\gamma_b M_b} - B_b \end{aligned} \quad (20)$$

ただし、

$$\alpha = \frac{1}{1 - \bar{\tau}}; \quad \gamma_a > 2, \quad \gamma_b > 2 \quad (21)$$

である。

3.2 多対多テレオペレーション

3.1のリアプノフ安定解析法から分かるように、行列 S がブロック対角行列であるので、システムが安定となる制御パラメータの条件が簡単に得られた。では、多対多遠隔制御システムの場合は、どうなるであろうか。本節では、この問題について考察する。

ネットワークを介した多対多遠隔制御システムの一般構成は図5に表すことができる。

図5.多対多ネットワーク遠隔制御システム

一般に、多対多遠隔制御システムは、ネットワーク部の接続行列によって接続され、このような系の制御設計問題はMIMO時変遅れ系の分散制御設計問題に帰着できる。簡単のために、以下に示す2種類のネットワーク接続の場合における遠隔システムについて考える。図6では、リング状の接続になっている。図7では、各クライアントの情報を一旦サーバに送信し、サーバから運動指令を配信されるようになっている。以下では、この2種類の接続について、リアプノフ安定解析法を適用し、制御パラメータの設計について考察する。

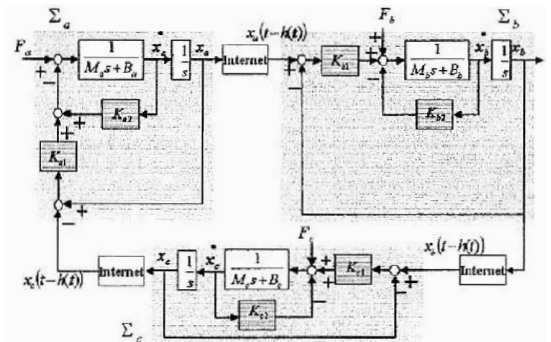


図6.リング状接続遠隔操作システム

リング状接続の場合の状態方程式は

$$\begin{aligned} \Sigma_a: \dot{x}_a &= A_a x_a(t) + B_a u_a(t) + A_{ca} x_c(t - h(t)) \\ \Sigma_b: \dot{x}_b &= A_b x_b(t) + B_b u_b(t) + A_{cb} x_a(t - h(t)) \\ \Sigma_c: \dot{x}_c &= A_c x_c(t) + B_c u_c(t) + A_{bc} x_b(t - h(t)) \end{aligned} \quad (22)$$

と表される。全システムをまとめると、

$$\dot{x}(t) = A_x x(t) + A_d x(t - h(t)) \quad (23)$$

と書き直すことができる。ただし、

$$\begin{array}{cccc}
 & & 0 & \\
 & & -B_b K_b & \\
 & & 0 & A_c - \\
 & 0 & 0 & A_{ca} \\
 A_d = A_{ab} & 0 & 0 & 0 \\
 & 0 & A_{bc} & 0
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 x_a(t) \\
 x_b(t) \\
 x_c(t)
 \end{array}
 \quad (24)$$

である。

したがって、行列 S は、

$$S = \begin{array}{cccccc}
 \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -2\left(\frac{K_a}{M_a}\right) & -2\left(\frac{K_{a2}+B_a}{M_a}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -2\left(\frac{K_{a1}}{M_a}\right) & -2\left(\frac{K_{a2}+B_a}{M_a}\right) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 2 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -2\left(\frac{K_{a1}}{M_a}\right) & 0
 \end{array}$$

であり、やはりブロック対角行列となる。ブロックごとに考えると、1対1の場合と同様に、システムを安定にする制御パラメータを容易に決定できる。

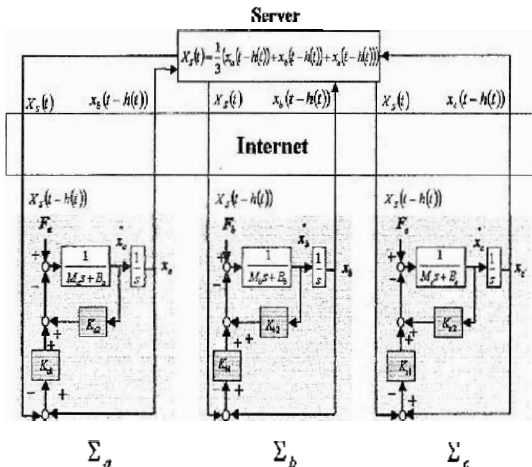


図7.サーバクライアント接続遅延操作システム

一方、サーバクライアント接続の場合、各クライアントの信号をサーバで加算平均し再び各クライアントへ

配信する場合、時間遅れ $X_s(t)$ は、

$$X_s(t) = \frac{1}{3}(x_a(t-h(t)) + x_b(t-h(t)) + x_c(t-h(t))) \quad (26)$$

となる。各クライアントにフィードバックする信号は、インターネットを介してさらに時間 $h(t)$ だけ遅れるので、

$$X_s(t-h(t)) = \frac{1}{3}(x_a(t-2h(t)) + x_b(t-2h(t)) + x_c(t-2h(t))) \quad (27)$$

となる。

したがって、各クライアントの状態方程式は

$$\begin{aligned}
 \Sigma_a: x_a &= A_a x_a(t) + B_a u_a(t) \\
 &\quad + \frac{1}{3}(x_a(t-2h(t)) + x_b(t-2h(t)) + x_c(t-2h(t))) \\
 \Sigma_b: x_b &= A_b x_b(t) + B_b u_b(t) \\
 &\quad + \frac{1}{3}(x_a(t-2h(t)) + x_b(t-2h(t)) + x_c(t-2h(t))) \\
 \Sigma_c: x_c &= A_c x_c(t) + B_c u_c(t) \\
 &\quad + \frac{1}{3}(x_a(t-2h(t)) + x_b(t-2h(t)) + x_c(t-2h(t)))
 \end{aligned} \quad (28)$$

と表され、まとめると

$$\dot{x}(t) = A_k x(t) + A_d x(t-2h(t)) \quad (29)$$

と書き直すことができる。ただし、

$$A_k = \begin{array}{ccc}
 A_a - B_a K_a & 0 & \\
 0 & A_b - B_b K_b & \\
 0 & 0 & A_c - B_c K_c
 \end{array}$$

$$A_d = \begin{array}{ccc}
 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1
 \end{array} \quad (30)$$

である。

$$\text{ここで、} S = 2A_k + A_d A_d^T + \frac{1}{1-\bar{\tau}} < 0 \text{ における}$$

$$= \frac{1}{9} \begin{vmatrix} 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (31)$$

であるため、行列 S もブロック対角行列にならず、この接続方法による制御パラメータの設計はかなり複雑になることが分かる。

4. おわりに

本研究報告は、時変通信遅れに焦点を絞って、文献 [6] をベースにしたネットワーク双方向遠隔システムの安定化設計について検討した。これによって、ネットワーク上における各クライアント間の接続形態によって制御パラメータ設計の難易が分かれることがわかった。今後の課題として、本研究室で構築したシステム上での実験検証が挙げられる。

最後に、本実験システムの構築に多大な協力を頂いた同研究室の成田将一君、高栖雄一郎君に謝意を表します。

5. 参考文献

- [1] Anderson R. and Spong M.: "Bilateral control of teleoperators with time delay", IEEE Trans. On Automatic Control 34(5): 494-501, 1989.
- [2] Niemeyer G. and Slotine J.: "Stable adaptive Teleoperation", IEEE J. of Oceanic Engineering 16(1): 152-162, 1991.
- [3] Hannaford B. and Fiorini P.: "A detailed model of bilateral Teleoperation", Proc. of the IEEE Int. Conf. On System, Man and Cybernetics, vol. 2. Los Alamitos, CA:IEEE, pp.117-122, 1998 (Beijing).
- [4] Y. YOKOKOHJI, T. IMAIDA, and T. YOSHIKAWA: "Bilateral Control with Energy Balance Monitoring Under Time-Varying Communication Delay", Proceeding of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.2684-2689, April 2000.
- [5] 江頭成人, 中村政俊, 後藤聡, 久良修輔: "インターネットを利用したロボットアームの相互位置同期遠隔制御", 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.611-612, 2000.
- [6] R. Oboe and P. Fiorini: "A Design and Control Environment for Internet-Based Telerobotics", The International Journal of Robotics Research, Vol.17, No.4, pp.433-449,