

## UDP プロトコルを用いた触覚通信システムの一設計法

A Design Approach of  
Haptic Communication System using UDP Protocol

80717889 矢代大祐 (Daisuke Yashiro) Supervisor 大西公平 (Kouhei Ohnishi)

## 1 序論

近年、ネットワークを介して音声や画像を通信するシステムが普及しつつある。一方で、触覚を通信するシステムの実用化はなされていない。その理由の1つは、視聴覚通信システムがフィードフォワード構造であるに対して、触覚通信システムはフィードバック構造であるためである。ネットワークを介した触覚通信は視聴覚通信と同様に通信遅延を伴うが、フィードバックループ内のむだ時間はシステムの安定性や性能を著しく劣化させる。このためにネットワークを介した触覚通信の実現は極めて困難な課題とされている。

そこで本研究では、触覚通信システムの安定化と性能向上を目的とした新しい設計法を提案する。1つ目に、未知の通信遅延に対してロバスト安定な触覚通信システムを実現するため、小ゲイン定理の  $L_2$  安定条件を満たす制御構造を提案する [1]。2つ目に、触覚通信システムの性能向上を図るために触覚情報を含むパケットのマスター・スレーブ間での送受信周期をリアルタイムに変化させるマルチレートサンプリング手法を提案する [2]。

## 2 小ゲイン定理に基づく安定化

図1に触覚通信システムを示す。 $G_1, G_2, E_1, E_2$  はそれぞれマスター、スレーブ、スレーブからマスターへの通信路（遅延時間  $T$ ）、マスターからスレーブへの通信路（遅延時間  $T$ ）を表す。 $G_1$  と  $G_2$  のブロック線図は図2に示される。 $C_1, C_4, C_m, C_s$  は位置制御ゲインを表し、 $C_2, C_3, C_5, C_6$  は力制御ゲインを表す。 $G_3, R_1, R_2, Y_1, Y_1$  は(1)式～(3)式で表わされる。

$$G_3 = \alpha \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ F_m^{ext} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_s^{ext} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Y_1 = \begin{bmatrix} X_m \\ F_m^{ext} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Y_2 = \begin{bmatrix} X_s \\ 0 \\ F_s^{ext} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中で  $X_m, X_s, F_m^{ext}, F_s^{ext}$  はそれぞれマスターの位置、スレーブの位置、マスターに加わる外力、スレーブに加わる外力を表す。

提案する制御構造では制御ゲインを(4)式のように設定する。適切なゲイン調整をすることで通信遅延時間や環境インピーダンスなどに依存せずに小ゲイン定理の  $L_2$  安定条件を満たすこ

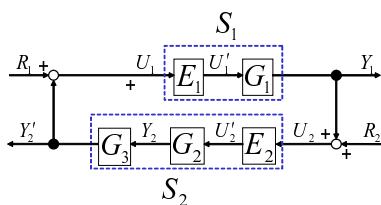
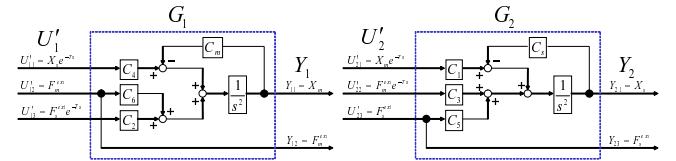


図1: 触覚通信システムの多入出力フィードバック系表現

図2:  $G_1$  と  $G_2$  のブロック線図

とができる。

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= C_s = C_p = k_p + k_v s, \\ C_2 &= C_3 = C_5 = C_6 = C_f = k_f, \\ C_m &= k_m + d_m s, \\ C_4 &= 0, \\ 0 &< \alpha < 1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

図3に提案する制御構造を用いた場合の実験結果を示す。位置や力の情報をLANを介して通信した。また、変動通信遅延( $200[\text{ms}] \leq T_1, T_2 \leq 300[\text{ms}]$ )を仮想的に挿入した。実験結果より安定な触覚通信ができることが分かる。さらに、スレーブがマスターに遅れて位置追従し、かつマスターの力応答がスレーブの力応答の0.8倍に追従するため、良好な性能が得られていることが分かる。よって、提案した制御構造の有効性が実験的に確認された。

## 3 マルチレートサンプリング手法に基づく性能向上

本研究では、マスター・スレーブプロボットの位置・速度・力情報をネットワークを介して UDP パケット (82byte) として送受信する。無線アドホックネットワークを介して触覚通信を行った場合のパケット送信周期  $t_p$  と往復通信遅延時間  $2T$  の関係を示す実験結果を図4に示す。実験では RTLinux を OS として用いた。また、無線通信には伝送速度が理論上 6 ~ 54Mbps でリアルタイムに変化する IEEE802.11a を用いた。図4より、パケット送信周期  $t_p$  が短くなると遅延時間が顕著に大きくなることが分かる。また、遅延時間が大きくなるばかりでなく、大量

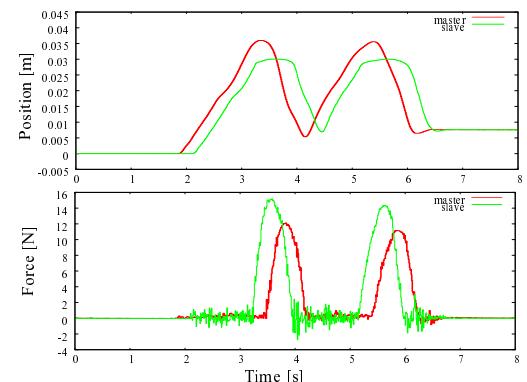


図3: 提案手法の実験結果

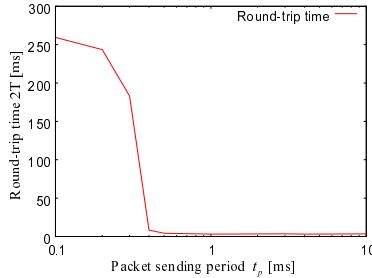


図 4: パケット送信周期  $t_p$  と往復通信遅延  $2T$  の関係

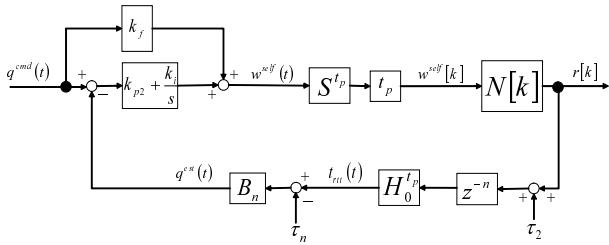


図 5: 提案するフロー制御器

のパケットロスが発生することが確認された。触覚通信システムは通信遅延によって著しく性能が劣化することが知られている。そこで、(5)式のようにパケット送信周期  $t_p$  をロボットの制御周期  $t_c$  より大きく設定するマルチレートサンプリング手法を提案する。

$$t_p \geq t_c \quad (5)$$

本手法によって制御性能が飛躍的に向上することが実験的に確認された。

#### 4 端末間フロー制御によるマルチレートサンプリング手法の拡張

図 4 に示したパケット送信周期  $t_p$  と往復通信遅延時間  $2T$  の関係は、ネットワーク状況に応じてリアルタイムに変化する。そこで、ネットワーク状況に応じて最適な  $t_p$  をリアルタイムに調整する手法を提案する。

図 5 に提案する端末間フロー制御器を示す。図中で  $H_0^{t_p}$ ,  $S^{t_p}$ ,  $k_{p2}$ ,  $k_i$ ,  $k_f$  はそれぞれ、0 次ホルダ、理想サンプラー、位置フィードバックゲイン、積分フィードバックゲイン、フィードフォワードゲインを表す。また、 $r[k]$ ,  $\tau_2$ ,  $t_{rtt}(t)$ ,  $t_n$  はそれぞれ、マスターからスレーブへの片道遅延、スレーブからマスターへの片道遅延、マスター・スレーブ間の往復遅延、マスター・スレーブ間の集線装置内の待ち時間を除く往復遅延のノミナル値を表す。さらに、 $w^{self}(t)$ ,  $B_n$ ,  $q^{est}(t)$ ,  $q^{cmd}(t)$  はそれぞれ、パケット送信レート、集線装置の処理速度のノミナル値、集線装置のバッファ内に蓄積されるパケット数の推定値、バッファ内のパケット数の指令値を表す。ただし、集線装置とはマスター・スレーブ間の通信路に存在するルータ、スイッチングハブ、無線コンバータなどを意味する。一般的に集線装置のバッファ内に蓄積されるパケット数が少ないほど、通信遅延  $r[k]$  は小さくなる。そこで提案手法では、2 自由度制御器の出力に基づき  $t_p$  を調整することで  $q^{est}(t)$  を制御し通信遅延  $r[k]$  を小さく保つ。

提案したフロー制御器を図 1 の触覚通信システムのマスター PC とスレーブ PC の両方に実装した実験結果を図 7 に示す。実験システムの構成は図 6 の通りである。 $S^{dis}$  と  $R^{dis}$  で表された PC 間では、 $S^{self}$  と  $R^{self}$  と同様に UDP パケットの送受信を行うことで外乱フローを生成した。 $t_p$  を一定値に設定した場合には、外乱フローの影響により 250[ms] ~ 300[ms] で

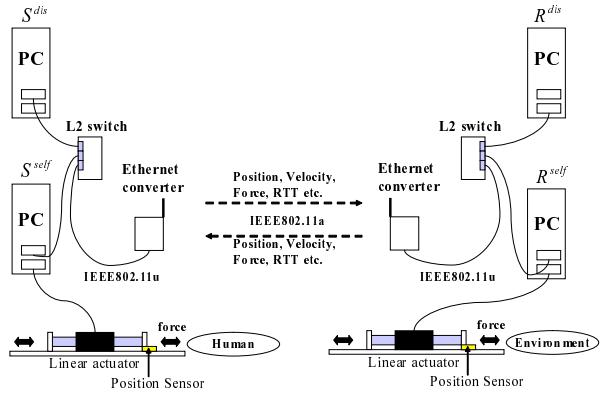
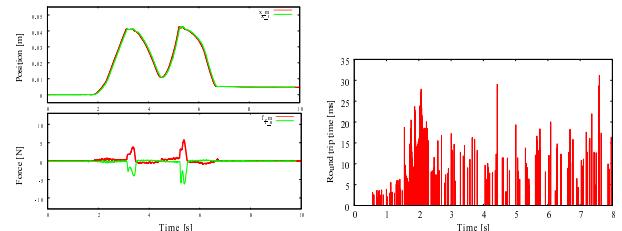


図 6: 実験システム



(a) 位置・力応答 (b) 往復遅延時間  
図 7: 提案手法の実験結果

変動する大遅延が発生し、性能が極めて悪かった。一方で、提案するフロー制御器を用いると図 7(a) のように  $x^m(t)$  は  $x^s(t)$  はほぼ一致しており、 $f_{ext}$  と  $f_s^{ext}$  の間で作用・反作用の法則が成立することが分かる。また、図 7(b) のようにそれほど大きな遅延時間は発生していない。これはネットワーク状況に応じてパケット送信周期  $t_p$  を調整しているためである。よって、提案手法の有効性が実験的に確認された。

#### 5 結論

本研究では、触覚通信システムの安定化と性能向上を目的とした新しい設計法を提案した。1 つ目に、未知の通信遅延に対してロバスト安定な触覚通信システムを実現するため、小ゲイン定理の  $L_2$  安定条件を満たす制御構造を提案した。2 つ目に、触覚通信システムの性能向上を図るために、触覚情報を含むパケットのマスター・スレーブ間での送受信周期をリアルタイムに変化させるマルチレートサンプリング手法を提案した。提案手法の有効性を確認するために、 $L_2$  スイッチと無線イーサネットコンバータを用いたネットワーク環境を構築し、実験を行った。なお、提案したマルチレートサンプリング手法は位置制御系や力制御系にも適用可能であることが実験的に確認されており、有用性と汎用性が高い手法といえる。

#### 参考文献

- [1] Daisuke Yashiro and Kouhei Ohnishi. L2 stable four-channel control architecture for bilateral teleoperation with time delay. In *IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 324–329, 2008.
- [2] Daisuke Yashiro and Kouhei Ohnishi. Multirate sampling method for bilateral control with communication bandwidth constraint. In *IEEE Int. Conf. on Industrial Technology*, 2009.