

博士論文

切替え型オブザーバによる不規則遅延の補償と その応用に関する研究

中村 幸紀

2009年3月16日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士(工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

中村 幸紀

審査委員：

杉本 謙二 教授	(主指導教員)
西谷 紘一 教授	(副指導教員)
平田 健太郎 准教授	(副指導教員)

切替え型オブザーバによる不規則遅延の補償と その応用に関する研究*

中村 幸紀

内容梗概

近年のイーサネット機器の低価格化により，産業用計装機器にもネットワークポートが標準装備されるようになってきた．これを背景に，汎用ネットワークを用いたネットワーク化制御系 (NCS; Networked Control Systems) の研究が注目されており，遠隔操作ロボットによる救援活動や，da Vinci や Zeus に代表される遠隔医療などへの応用が期待されている．

しかしながら，ネットワークの利用状況に応じて伝送遅延は不規則に変動するため，制御性能の劣化を引き起こし，最悪の場合フィードバック系の不安定化を招く．このため，不規則遅延の影響をいかにして抑えるかが課題であった．

通常 NCS においては，伝送遅延は未知の時変要素としてモデル化されることが多い．一方，パケットの送信時にタイムスタンプを付加し，受信時に遅延時間を求める方法が知られている．これにより，予め遅延時間を知ることはできないにせよ，少なくとも信号の受信時に計測することができる．

そこで，本論文では，タイムスタンプ情報を用いた不規則遅延の補償方法について議論する．

まず，遅延時間に応じてゲインを切替えるオブザーバ (切替え型オブザーバ) を提案する．オブザーバの設計問題は，切替えを伴う推定誤差系の安定化問題へ帰着される．また，ジッタバッファを用いたものに比べて推定誤差の収束速度が改善される．

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 博士論文, NAIST-IS-DD0661018, 2009 年 3 月 16 日.

つぎに、実ネットワーク上での遅延補償問題に対する提案法の有効性について議論する．ここでは、タイムスタンプの実装で要求される送受信側の計算機時刻の同期について検討し、クロックスキューに対する補正や NTP(Network Time Protocol) により必要な精度内で同期できることを確認する．また、NCS の一例として、通信路を介した複数機器による連動作業をとりあげ、提案法が実際のネットワーク上で動作することを実験により検証する．

キーワード

ネットワーク化制御系, 伝送遅延, 切替え型オブザーバ, タイムスタンプ, 連動

Compensation for Random Delay via Switching Observer and its Application*

Yukinori Nakamura

Abstract

In recent years, it has become popular for factory automation equipment to have Ethernet ports owing to the reduced cost of the network hardware. Based on this fact, networked control systems (NCS) over a shared network have been attracting much attention. Technology of control over a network has potential applications to disaster rescue by teleoperated robots and telesurgery such as da Vinci and Zeus.

However, when information is sent out over a network, transmission delay is inevitable. Since network congestion is a non-stationary phenomenon, the delay varies irregularly. The time-varying delay often results in control performance degradation and instability of feedback systems.

Existing studies employ conservative modeling of the transmission delay as an uncertain element. In contrast, this thesis actively use available information of the current transmission delay. The delay length may be obtained from the difference between the time-stamp (time of sending) of receiving data and the current time.

In this thesis, compensation for random delay based on time-stamp information is studied.

In the first part, a gain switching observer is proposed. According to the delay length, the observer selects gain. The observer synthesis problem is reduced to

*Doctoral Dissertation, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DD0661018, March 16, 2009.

the stabilization problem of switched estimation error systems. Compared with jitter buffer, the switching observer improves error convergence speed.

In the second part, the practical advantage of the proposed method is discussed. To calculate the instantaneous value of transmission delay length via the time-stamp, the clocks of sending and receiving computers must be synchronized. It is shown that the correction of clock skew and clock adjustment via Network Time Protocol (NTP) can provide the time synchronization within a required accuracy for moderate sampling periods. The proposed method is demonstrated by an experiment of synchronization of multiple plants over a real network.

Keywords:

networked control systems, transmission delay, switching observer, time-stamp, multiple plants synchronization

目次

1. はじめに	1
1.1 ネットワーク化制御系	1
1.2 切替え系	5
1.3 研究目的	9
2. 切替え型オブザーバによる遅延補償	12
2.1 本章の概要	12
2.2 不規則遅延を有する系の定式化	12
2.3 切替え型オブザーバ	15
2.4 減衰率指定による切替え型オブザーバの性能改善	18
2.5 H_∞ 制御理論に基づく設計	19
2.6 数値シミュレーション	23
2.6.1 定理 1 に基づく設計	23
2.6.2 減衰率指定による設計	24
2.6.3 H_∞ 設計	26
2.7 オフライン推定実験	27
2.7.1 実験方法	27
2.7.2 実験結果	29
2.8 本章のまとめ	30
3. 実ネットワークを介した複数機器の連動	31
3.1 本章の概要	31
3.2 計算機時刻の同期	32
3.2.1 計算機時計の概要	32
3.2.2 時刻誤差の測定	33
3.2.3 時刻誤差への補正	36
3.3 切替え型オブザーバを用いた連動	39
3.3.1 対象とするシステム	39

3.3.2	切替え型オブザーバの設計	41
3.3.3	予備実験	42
3.4	実ネットワークを用いた検証実験	46
3.4.1	実験方法	46
3.4.2	シミュレーション結果	47
3.4.3	実験結果	49
3.5	高負荷なネットワーク環境下での検証	51
3.5.1	実験方法	51
3.5.2	実験結果	53
3.6	本章のまとめ	54
4.	おわりに	55
	謝辞	56
	参考文献	57
	付録	67
A.	Schur complement (Schur の補題)	67
B.	オンラインで参照値を与える場合の連動	67

目 次

1	ジッタバッファ	2
2	乗法的不確かさに基づく伝送遅延の表現	3
3	重み関数 W と不確かさの周波数特性	4
4	マルコフ連鎖による遅延のモデル化の一例	5
5	PWM 駆動昇圧型コンバータ	6
6	Chua 振動子の位相面軌道 ($x_1 - x_2$ 平面)	7
7	位相面軌道	8
8	タイムスタンプによる遅延計測	10
9	伝送遅延を考慮した拡大系	13
10	離散時間の不規則遅延を有する系	14
11	拡大系およびゲイン切替え型オブザーバ	15
12	遅延の影響による受信の種類	16
13	伝送遅延時間の推移	23
14	推定結果 (定理 1 に基づく設計)	24
15	推定結果 (減衰率指定)	24
16	推定誤差 (減衰率指定)	25
17	推定誤差の推移	26
18	推定誤差 (H_∞ 設計)	26
19	倒立振子系	27
20	推定実験の流れ	28
21	遅延時間の推移 (オフライン推定)	28
22	実験結果 (オフライン推定)	30
23	複数工作機器による加工作業	31
24	時刻同期精度および制御サンプル周期の時間スケール	32
25	時刻誤差の計測方法	34
26	計算機時刻の誤差	34
27	位相差	35
28	位相差 (時刻誤差) の時間変化	36

29	サンプリング周期補正後の時刻誤差	37
30	NTP による補正のタイムチャート	38
31	NTP による補正	39
32	NTP 実施後の時刻誤差	39
33	ネットワークを介した連動システム	40
34	円盤駆動型 DC モータ (左: 真上図, 右: 正面図)	42
35	実験装置の構成 (予備実験)	43
36	遅延時間の推移 (予備実験)	43
37	オブザーバ未使用時 (予備実験)	45
38	オブザーバ使用時 (予備実験)	45
39	推定誤差 (予備実験)	46
40	実験装置の構成 (実ネットワークによる検証)	47
41	遅延時間の推移 (実ネットワークによる検証)	48
42	オブザーバ使用時 (シミュレーション)	48
43	推定誤差 (シミュレーション)	49
44	オブザーバ未使用時 (シミュレーション)	49
45	オブザーバ使用時 (実ネットワークによる検証)	50
46	推定誤差 (実ネットワークによる検証)	51
47	オブザーバ未使用時 (実ネットワークによる検証)	51
48	実験装置の構成 (高負荷な環境下での検証)	52
49	遅延時間の推移 (高負荷な環境下での検証)	52
50	オブザーバ未使用時 (高負荷な環境下での検証)	53
51	オブザーバ使用時 (高負荷な環境下での検証)	53
52	推定誤差 (高負荷な環境下での検証)	54
53	オンラインの場合の連動システム	68
54	オンラインの場合	70

表 目 次

1	倒立振子のパラメータ	29
2	DC モータと PI 補償器のパラメータ	44

記号

\mathbb{R} : 実数全体の集合

\mathbb{Z} : 自然数全体の集合

I_n : $n \times n$ の単位行列

$\mathbf{0}_{m \times n}$: $m \times n$ の零行列

M' : 行列 M の転置

\max : 最大

$\|\cdot\|_{\ell_2}$: ℓ_2 ノルム

$\|\cdot\|_{\infty}$: H_{∞} ノルム

$\Pr(\cdot \mid \cdot)$: 条件付確率

1. はじめに

1.1 ネットワーク化制御系

従来，工場内の信号の伝送では現場機器 (センサ，アクチュエータ) からの一つアナログ信号に対して一本の配線を用いる point-to-point 接続が主流であった．その後，1970 年代にデジタル通信を用いた工場内のネットワーク化が進み，さらに 80 年代半ばから 90 年代にかけてフィールドバスが導入された．フィールドバスでは，現場機器・制御対象・コントローラがバスと呼ばれる一本の配線を共有して信号が伝送されるため，point-to-point 接続に比べて配線の本数や保守管理コストを抑えることができる．フィールドバスの種類は多岐に渡り，代表的なものには，プロセスオートメーション用の FOUNDATION Fieldbus[49]，PROFIBUS PA[50] や，ファクトリーオートメーション用の PROFIBUS DP[50]，DeviceNet[51]，CC-Link[52]，INTERBUS[53] などがあり，現在も広く利用されている．

さらに近年，より多くのデータ伝送を想定して，Ethernet を導入する動きも見受けられる．産業用の Ethernet は特に Real-Time Ethernet[45, 46, 47] と呼ばれ，通信の信頼性やリアルタイム性を重視したものである．2007 年には，国際電気標準会議 (IEC; International Electrotechnical Commission)[48] で，TCnet[54] や Vnet/IP[55] などの Real-Time Ethernet が国際規格として承認され，今後より一層工場内に浸透していくと期待される．

このような背景から，生産・加工現場にフィールドバスや Ethernet が普及した頃にかけてネットワークを介した制御に対する問題意識が高まった．そして，汎用ネットワークを用いたネットワーク化制御系 (NCS; Networked Control Systems)[42] の概念が生まれ，制御工学の分野で広く認知されるようになった．さらに，昨今の遠隔医療技術 [35, 36]，無人飛行機 (UAV; Unmanned Aerial Vehicle)[82, 83, 84] や遠隔操作ロボットによる災害救援活動 [81] 等への関心の高まりも相まって，NCS の研究が注目されている．

しかし，これまでの制御工学では，制御性能に影響を及ぼす要因として外乱やモデル化誤差等が考えられていたが，NCS ではネットワークの通信品質 (損失確

率, 通信容量, 伝送遅延の変動) も関係しており, これらを考慮した設計や解析が現在も活発に議論されている [87, 88, 89]. 例えば, 文献 [85] では, 確率的にデータ損失が発生する場合を考え, NCS が二乗平均安定となる損失確率の条件を導出している. 文献 [86] は, 通信容量制約により量子化信号が伝送される NCS に対して, 推定器の性能と通信路制約の関係を検討している.

また, 近年 NCS の研究を協調制御に応用する動きもある. 協調制御とは, 複数のエージェント (サブシステム) が互いに情報をやりとりしながら系全体である制御目的を達成することである. その制御目的には, 全てのエージェントの状態が一定値に収束する同意 (consensus), 適切な位置にセンサを配置する被覆 (coverage), エージェントの挙動を一致させる同期 (synchronization) 等がある. NCS と関連するものとしては, エージェント間の伝送遅延を考慮した合意問題 [90] や同期 [91], 被覆問題をモバイルセンサネットワークの形成 [92] に応用したものが報告されている.

本節では, NCS における伝送遅延の補償問題を取り上げ, 概観していく. まず, 文献 [26, 27] でジッタバッファ (図 1) の利用を想定したものが提案されている. この手法では, 仮に遅延が変動して受信信号の到着間隔が不均一になったとしても, バッファに信号を蓄えることでその影響を補正することができる. その結果, 信号の遅延時間は一定となり, 制御対象と Delay buffer を含む拡大系は時不変なものとして扱うことができる. しかし, ジッタバッファでは信号を最大遅延時間だけメモリに保存する必要があるため, 速応性が要求される制御では不向きである.

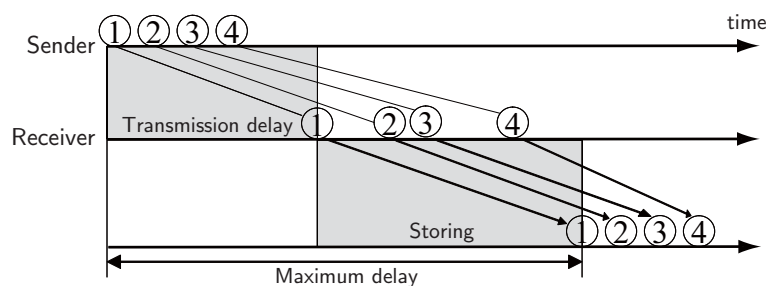


図 1 ジッタバッファ

一定遅延を前提とする NCS は他にもいくつかあり [59, 56, 57, 58, 3], 文献 [59] では, バイラテラル制御系に対して, スキャタリング変換を行うことで, 系全体を受動化 [60](安定化) する手法が提案されている. また, [56, 57, 58] では, プラントをネットワーク越しの離散時間コントローラで制御する問題が扱われ, 閉ループ系の安定性を保証するサンプル周期と遅延時間の関係が解析されている.

以上の結果は, 遅延が一定の場合を前提としているが, フィールドバスや Ethernet ではネットワークを共有するため, 高負荷な環境下で信号の伝送遅延は不規則に変動する. その影響で制御性能の劣化や系の不安定化が発生することが知られており [8, 9, 10, 11], NCS では遅延の変動を考慮する必要がある. 時変遅延の場合には, 遅延をどのようにモデル化するかで主に三つに分類できる.

まずよく知られているのは, 遅延の変動をシステムのモデル化誤差, すなわち未知の不確定時変要素として規定する場合である [9, 61]. 例えば, 公称プラント G に対して, 出力むだ時間要素 $e^{-\tau s}$, $\tau \in [0, \tau_{\max}]$ が含まれたシステムを考える. $G(s)e^{-\tau s} = G(s)\{1 + (e^{-\tau s} - 1)\}$ より $(e^{-\tau s} - 1)$ の部分を乗法的な不確かさ

$$e^{-\tau s} - 1 = W(s)\Delta(s), \|\Delta\|_{\infty} \leq 1$$

とみなすことができる (図 2). Δ は規格化した変動, W は重み関数である. 遅延

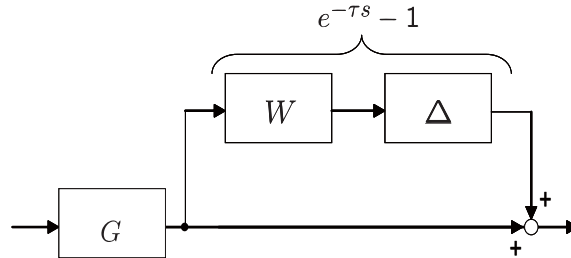


図 2 乗法的な不確かさに基づく伝送遅延の表現

時間 $\tau \in [0, \tau_{\max}]$ に対して,

$$|e^{-\tau s} - 1| \leq \left| \frac{2.1j\omega}{j\omega + \frac{1}{\tau_{\max}}} \right|, \forall \omega \in \mathbb{R}$$

の関係式が成立するため, 重み関数 W を

$$W(s) = \frac{2.1s}{s + \frac{1}{\tau_{\max}}}$$

と選ぶことができる (図 3).

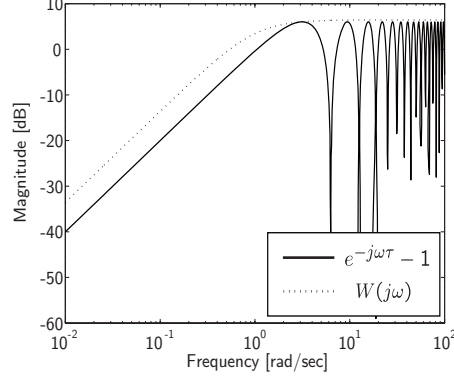


図 3 重み関数 W と不確かさの周波数特性

このような不確かさに対して, H_∞ 制御や μ 設計等によるロバスト安定化を行うことで, 遅延の影響が補償される.

また, 遅れ時間 τ の上限や変化率が有界 ($\tau \leq \tau_1 < \infty$, $\dot{\tau} \leq \tau_2 < \infty$) という条件のみで遅延をモデル化することもある [64, 65, 66, 67, 62, 8, 63]. 例としては, 遅れ時間がサンプル周期未満 [8], 一定の割合で増加 ($\dot{\tau} = 1$) [62], 信号の追越しがない場合 ($\dot{\tau} \leq 1$) [63] などが挙げられる. 解析や設計の際には, 遅延を伴う NCS を微分差分系で記述し, Lyapunov-Krasovskii 汎関数 [68] を用いた手法が見受けられる [64, 65, 66, 67, 62]. 多くの場合, このアプローチにより NCS の安定性に関する線形行列不等式 (LMI; Linear Matrix Inequality) [33] 条件が導出されている.

他方, 遅延の変動を確率モデルで記述し, その統計的性質から解析や設計をおこなう方法も提案されている [69, 70, 71, 72, 73]. 文献 [69, 70, 73] では, マルコフ連鎖 (Markov chain) [74] に基づく遅延の特徴づけがされている.

[70] の場合, 遅延の時系列 $\{\tau_d(k), k \in \mathbb{Z}\}$ は, 次式を満たす確率過程としてモデル化されている.

$$\begin{aligned} P(\tau_d(k+1) = i_{k+1} \mid \tau_d(k) = i_k, \tau_d(k-1) = i_{k-1}, \dots, \tau_d(0) = i_0) \\ = P(\tau_d(k+1) = i_{k+1} \mid \tau_d(k) = i_k) \end{aligned}$$

上式は, $k+1$ 時点での遅延 $\tau_d(k+1)$, $k \in \mathbb{Z}$ が, 一時点前の遅延 $\tau_d(k)$ にのみ依存することを表しており, このような確率過程をマルコフ過程 (Markov property) と

いい，特に離散的な値をとるマルコフ過程をマルコフ連鎖とよぶ．遅延 $\tau_d(k) = i$ から $\tau_d(k+1) = j$ への遷移確率 q_{ij} とすると，遅延の変動は図 4 の遷移図で表すことができる．

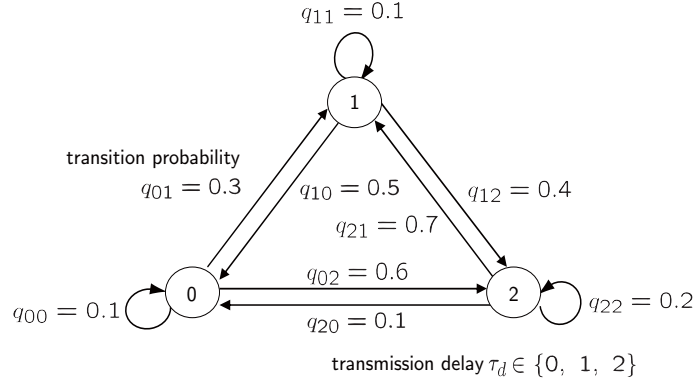


図 4 マルコフ連鎖による遅延のモデル化の一例

遷移確率 q_{ij} は次式を満たすものとする．

$$q_{ij} = \Pr(\tau_d(k+1) = j \mid \tau_d(k) = i), \quad 0 \leq i, j \leq h_\tau, \quad k \in \mathbb{N}$$

$$\sum_{j=0}^{h_\tau} q_{ij} = 1,$$

また，文献 [69, 73] では，ネットワーク負荷に応じて遅延の分布を複数用意し，分布の遷移がマルコフ連鎖に従うと仮定して議論されている．

1.2 切替え系

切替え系は，一般に有限個のサブシステムで構成され，ある規則に従って別のサブシステムに遷移する．連続時間の線形切替え系は，

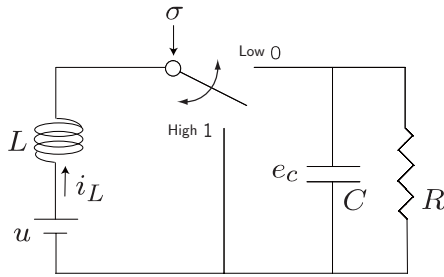
$$\dot{x} = A_\sigma x, \quad \sigma \in \mathcal{P} = \{0, 1, \dots, N\} \quad (1)$$

と記述される． σ はサブシステムの添字の値をとる切替え信号 (switching signal) であり，ある瞬間にどのサブシステムに遷移しているかを表す．切替わるタイミングは時間や状態量に依存し，それぞれ時間依存型切替え (time-dependent switching)，

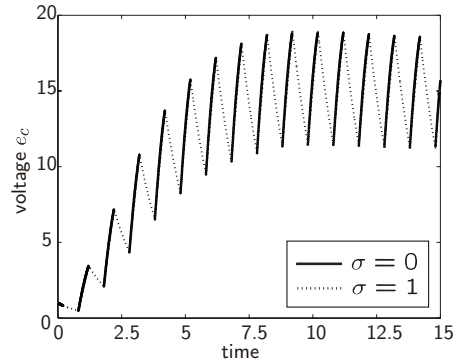
状態依存型切替え (state-dependent switching) という.

例 1. (PWM 駆動昇圧型コンバータ)[6]

図 5(a) に示す回路は, 信号 σ の電圧レベルが High(1)/Low(0) により回路のスイッチが切替わる DC-DC コンバータである. u , e_c , e_L , i_L は直流電源の電圧, コンデンサへの電圧, コイルへの電圧および電流である. $\sigma = 1$ のときコイルにエネルギーが蓄えられるが, $\sigma = 0$ ではコイルに逆起電力が発生し, コンデンサに電流が流れてエネルギーが蓄えられる. このとき, $e_c = u + e_L$ となり, 入力電圧 u よりも大きな出力 e_c を取り出すことができる.



(a) 回路図



(b) 出力波形

図 5 PWM 駆動昇圧型コンバータ

σ の値は, デューティ比 (一周中に $\sigma = 1$ となる時間の割合) に応じて周期的に変化するため, この系は時間依存型の切替えを伴う. $x := [e_c \ i_L]'$ とおくと, 状態方程式は次式のように記述できる.

$$\dot{x} = \begin{cases} \begin{bmatrix} -1/(RC) & 1/C \\ -1/L & 0 \end{bmatrix} x & \text{if } \sigma = 0 \\ \begin{bmatrix} -1/(RC) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/L \end{bmatrix} u & \text{if } \sigma = 1 \end{cases}$$

$R = 40$, $L = 20$, $C = 0.03$, $u = 10$ としたときの電圧 e_c の波形を図 5(b) に示す. 同図より入力電圧 u よりも大きな出力が得られていることが分かる.

例 2. (Chua 振動子)[41]

カオス系の一種である Chua 振動子は

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} a_1 a_2 (-x_1 + x_2 - f_\sigma(x_1)) \\ a_1 (x_1 - x_2 + x_3) \\ a_1 (-a_3 x_2 + a_4 x_3) \end{bmatrix}$$

$$f_\sigma(x_1) = \begin{cases} a_5 x_1 + a_6 (-(x_1 + 1) + (x_1 - 1)) & \text{if } \sigma = 0 \ (x_1 < -1) \\ a_5 x_1 + a_6 ((x_1 + 1) + (x_1 - 1)) & \text{if } \sigma = 1 \ (-1 \leq x_1 \leq 1) \\ a_5 x_1 + a_6 ((x_1 + 1) - (x_1 - 1)) & \text{if } \sigma = 2 \ (1 < x_1) \end{cases}$$

と表される. a_i , $i = 1, 2, \dots, 6$ は定数である. 上式よりこの系は, x_1 を引数にもつ区分的線形な項 f_σ を含んでおり, 状態依存型切替え系である. 図 6 に位相面軌道を示す. なお, パラメータを $a_1 = 1$, $a_2 = 10$, $a_3 = 20$, $a_4 = 0.1$, $a_5 = -0.75$, $a_6 = -0.4$ と設定した.

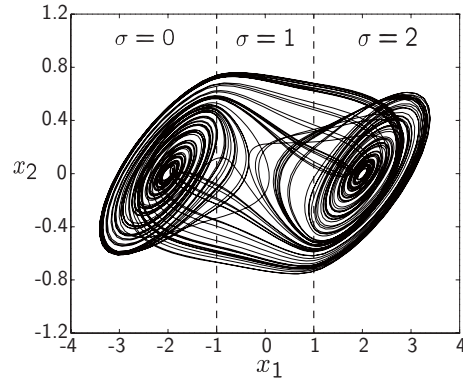
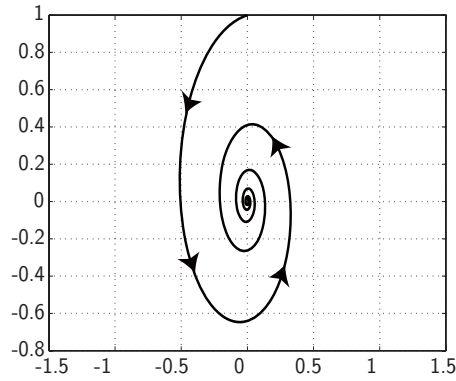


図 6 Chua 振動子の位相面軌道 ($x_1 - x_2$ 平面)

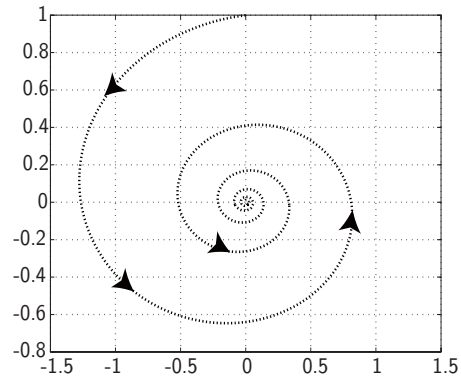
切替え系の特徴として, 各サブシステムが安定な場合でも, 系全体の安定性は保証されないことが挙げられる. 例えば, 切替え系 (1) の A_σ , $\sigma = 0, 1$ が以下のような場合を考える.

$$A_0 = \begin{bmatrix} -1 & -4 \\ 10 & -1 \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} -1 & -10 \\ 4 & -1 \end{bmatrix},$$

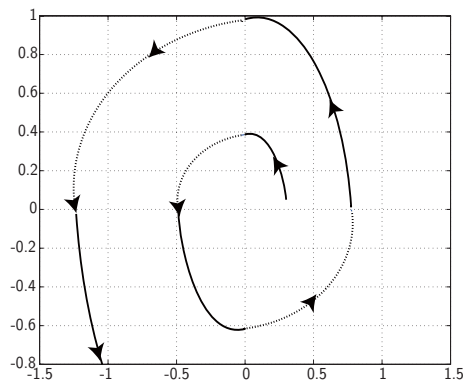
これらのサブシステムの極は複素左半平面上にあるため、切替えがなければ状態は原点に収束する (図 7(a), (b)). ところが、図 7(c) に示すように切替えを伴うことで不安定化することが分かる.



(a) サブシステム $\sigma = 0$



(b) サブシステム $\sigma = 1$



(c) 切替えを伴う場合

図 7 位相面軌道

このように、切替え系では、各サブシステムの安定性を議論するだけでは不十分であり、時不変系とは異なる解析や設計が要求される.

従来、切替え系の安定解析では、任意の切替え (arbitrary switching) に対する安定条件と、安定となる切替えタイミングの条件に関する研究がされてきた.

まず、任意の切替えに対する安定性については、サブシステムの構造に着目したものが報告されている. 例えば、線形切替え系の A 行列が可換の場合 [75] や、Lie

代数の可解性 [76] を満たすときに切替え系が安定となる。他方、サブシステムの種類を限定せず、より一般的な場合に対しては、共通 Lyapunov 関数 [28, 29] に基づく解析手法がある。共通 Lyapunov 関数とは、サブシステムの Lyapunov 関数が全て同じ場合を指し、その存在性が切替え系の安定性の十分条件となることが知られている。また、解析結果の保守性を軽減するために、非共通の Lyapunov 関数 (switched quadratic Lyapunov functions[37]) による手法も提案されている。

一方、任意の切替えという制約を緩和し、特定の切替えパターンに対する安定性の検討もされている [77, 78, 79]。文献 [77] では、短期間で頻繁に切替えが起これば不安定化すると考えて、滞留時間 (dwell time) と呼ばれる概念を導入しており、滞留時間内に他のサブシステムへの遷移が起これなければ安定となることが示されている。また、各サブシステムごとに Lyapunov 関数を用意し、切替え時刻において関数の値が単調減少する multiple Lyapunov functions に基づく解析手法 [80, 93, 94] もある。

切替え系の設計では、前述の共通 Lyapunov 関数などを用いることが多く、その存在性が切替え系の安定化のための十分条件となる [28, 29]。特に線形切替え系では、二次形式の共通 (非共通) Lyapunov 関数の候補を考えることで系の安定化可能性は、連立 LMI 条件として記述される [28]。

また、設計方針として、単一のゲインを設計するもの (以下、単一ゲイン型) と、サブシステムごとにゲインを用意するもの (以下、ゲイン切替え型) の二種類がある。ある瞬間にどのサブシステムに遷移するかが未知の場合、単一ゲイン型が要求される。既知の場合には両方の設計法を適用できるものの、切替え型を用いることで制御性能が改善される傾向にある。その詳細については、第 2 章で述べることにする。

1.3 研究目的

本研究では、NCS における不規則遅延の補償問題について検討する。1.1 節では、遅延の変動を

- モデル化誤差

- 上限・変動率のみ規定
- 確率モデル

に分類したが，その多くは遅延の変動は未知という制約が課されているため，設計が保守的になる可能性がある．ここでは，タイムスタンプを用いて遅延をモデル化する．タイムスタンプとは送信時刻情報のことであり，信号に付加することで，受信時にタイムスタンプと現在時刻との差から遅延時間を求める方法が知られている [12](図 8)．

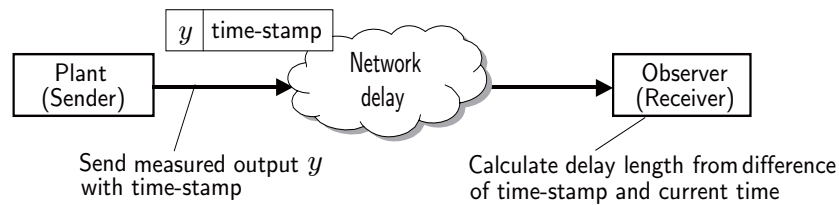


図 8 タイムスタンプによる遅延計測

この計測法により，予め遅延時間を知ることはできないにせよ，少なくとも信号の受信時に既知として扱うことができる．これにより，遅延時間を陽に活用した設計が可能となる．

また，タイムスタンプを用いることで NCS はつぎのように記述される．まず，対象とする NCS を離散時間の変動むだ時間系として考えると，この系は遅延時間に応じて delay buffer からの取り出しタップ位置が変化することがわかる．よって，このむだ時間系を状態空間表現すると，その C 行列は時変となる．タイムスタンプにより C 行列の切替わるタイミングが分かるため，時変遅延を有する NCS は，結果的に切替え系として定式化される．この切替え系に対して，単一ゲイン型と切替え型の設計が考えられるが，1.2 節で述べたように性能の観点から切替え型の適用が妥当と思われる．

そこで，本論文では，タイムスタンプを活用したゲイン切替え型オブザーバ(以下，切替え型オブザーバ)による遅延の補償方法を提案する．このオブザーバは，タイムスタンプにより得られる遅延時間に応じてゲインを切替えていく．この機

構は、切替え信号が事前に与えられる時間依存型や状態依存型とは異なり、受信時(事象発生時)にゲインを切替えるため、事象駆動型といえる。推定誤差系は切替えを有するため、その安定性が保証されるようにゲインを設計していく。その際に、レギュレータとオブザーバの双対関係より従来のスイッチング制御器の設計手法を適用することができる。

スイッチング制御器は切替え系の研究が注目される前から存在し、例えば、設定した切替え面内に状態を拘束するスライディングモード制御 [43] や、制御入力 of 上下限值のみ用いる bang-bang 制御などが挙げられる。一方、既に述べたように線形切替え系の安定化問題は、連立 LMI の可解問題に帰着される。LMI に関しては、計算機の性能向上や、求解アルゴリズム (内点法 [44]) の開発を背景に、数値計算で効率よく解を求めることができる。このため、近年では LMI を用いてスイッチング制御器を設計することが多く、区分的アファイン系に対する状態依存型のスイッチング制御もその一例である [38, 39, 40]。以上の理由から、LMI に基づく最適化手法により切替え型オブザーバを設計していく。

つぎに、タイムスタンプによる遅延計測の有効性について議論する。そもそもこの計測方法では、送受信側の計算機時刻を必要な精度内で一致させることができる、という仮定が前提としてある。本研究ではこの仮定の妥当性を検証する。

最後に、切替え型オブザーバをネットワーク上での連動に応用する。ここでは、複数工作機器による加工作業を考え、ネットワーク越しで機器の応答をワーク (加工される対象物) に追従させる。切替え型オブザーバによりワークの挙動を推定することで、伝送遅延の影響が抑えられ、連動が達成される。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では、切替え型オブザーバによる遅延の補償方法を述べる。第 3 章では、タイムスタンプによる遅延計測の有効性について議論する。さらに、本手法を用いた機器の連動について述べ、実ネットワーク上での検証を行う。第 4 章で本論文のまとめとする。

2. 切替え型オブザーバによる遅延補償

2.1 本章の概要

ここでは、切替え型オブザーバについて述べ、その性能評価をおこなう。準備として、2.2節では、伝送遅延を有する NCS の定式化を行う。遅延の時変性により Delay buffer の取り出しタップ位置が変わるため、対象とするシステムが切替え系として記述できることを示す。

遅延補償問題を従来のスイッチング制御の枠組みで議論できることを踏まえて、2.3節では切替え型オブザーバの設計方法を述べる。共通 Lyapunov 関数に基づく方法で設計することにより、任意の切替え、すなわち遅延の不規則性に対して推定誤差の安定性が保証されることを示す。

2.4節では、推定誤差の収束速度を改善するために Lyapunov 関数の減衰率を導入した設計法を説明する。また、2.5節では、システムのもつ不確かさに対してロバストな切替え型オブザーバについて考える。設計に際しては、未知外乱に対する感度低減化を実現する H_∞ 制御理論 [30, 31, 32] を用いる。本手法では、感度低減の度合いを示す指標として、外乱と評価出力の ℓ_2 ノルム比を用いており、その比が最小となるようなゲインを求めることができる。

2.6節では、これらの設計手法を用いて切替え型オブザーバを設計し、数値シミュレーションをおこなう。また、前章で述べたジッタバッファや単一ゲイン型設計と比較して、ゲイン切替え型が誤差の収束速度の点で優位であることを示す。2.7節で倒立振子系を用いたオフラインの推定実験をおこない、提案法の有効性を確認する。2.8節で本章のまとめとする。

2.2 不規則遅延を有する系の定式化

制御対象の観測出力がネットワークを用いて逐次伝送される場合について考える (図 8)。制御対象は線形時不変離散時間系であり、つぎの状態方程式で表さ

れる.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad (2a)$$

$$y(k) = Cx(k), \quad k \in \mathbb{N} \quad (2b)$$

$x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$, $y \in \mathbb{R}^p$ はそれぞれ状態量, 制御入力, 観測出力である. また, (C, A) は可観測とする.

サンプル時刻 kh , $k \in \mathbb{N}$ (h : サンプルング周期) においてオブザーバ側で受信された y の遅延時間を $d(k)$ と表し, 以下の条件を仮定する.

仮定 1. 遅延 d は時変であるが有界. すなわち, $h_d = \max_{k \in \mathbb{N}} d(k) < \infty$.

本論文では, このような離散時間の変動むだ時間系を, つぎのようにモデル化する. まず図 9 に示すように, delay buffer を制御対象の出力端につなぐことで信号 y の伝送遅延を表現する.

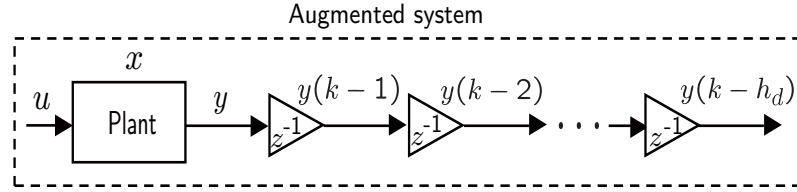


図 9 伝送遅延を考慮した拡大系

そして, 制御対象 (2) の状態量 x および観測出力 $y(k-d)$, $d = 1, 2, \dots, h_d$ から成るベクトル

$$x_a = \begin{bmatrix} x' & y'(k-1) & \dots & y'(k-h_d) \end{bmatrix}'$$

を考え, 以下のような拡大系を定義する.

$$x_a(k+1) = Ax_a(k) + B_a u(k), \quad (3a)$$

$$y(k-d(k)) = C_a(d(k))x_a(k), \quad k \in \mathbb{N}, \quad (3b)$$

$$A_a = \left[\begin{array}{c|c} A & \mathbf{0}_{q_1 \times r_1} \\ \hline C & [I_{q_2} \quad \mathbf{0}_{q_2 \times p}] \end{array} \right], \quad B_a = \begin{bmatrix} B \\ \mathbf{0}_{r_1 \times m} \end{bmatrix},$$

$$C_a(d) = \begin{cases} \begin{bmatrix} C & \mathbf{0}_{p \times r_1} \end{bmatrix} & \text{if } d = 0 \\ \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{p \times r_2} & I_p & \mathbf{0}_{p \times r_3} \end{bmatrix} & \text{if } d = 1, 2, \dots, h_d, \end{cases}$$

$$q_1 = n + p, \quad q_2 = p(h_d - 1),$$

$$r_1 = ph_d, \quad r_2 = n + pd - p, \quad r_3 = p(h_d - d)$$

遅延 d の変動により拡大系 (3) の C_a 行列は一般に未知であるが、タイムスタンプにより C_a 行列の切替わるタイミングを知ることができる。

したがって、不規則遅延を伴う系は、状態空間モデルで表現すると切替え系として定式化することができる (図 10)。

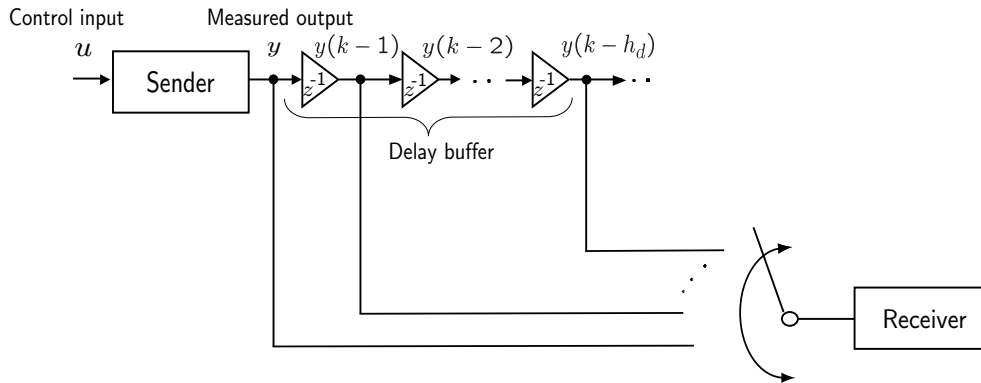


図 10 離散時間の不規則遅延を有する系

以下では、拡大系 (3), すなわち観測信号 y がネットワークを用いて伝送される制御対象 (2) の状態推定を考える。伝送遅延の影響を補償するために、前述のタイムスタンプを用いて y の遅延を計測し、その遅延時間に基づいて切替え型オブザーバにより推定をおこなう。次節では、オブザーバの設計方法について述べる。

2.3 切替え型オブザーバ

図 11 に示すように提案するオブザーバは，複数のオブザーバゲイン $F(d)$, $d = 0, 1, \dots, h_d$ で構成され，信号 y の遅延時間 d に応じてゲインを切替える．遅延

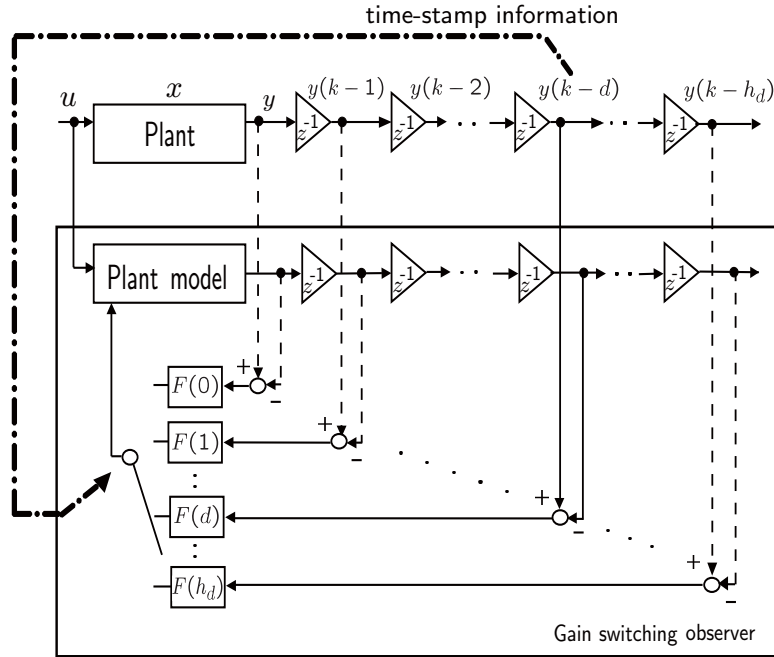


図 11 拡大系およびゲイン切替え型オブザーバ

d は不規則に変動するため，信号の同時受信 (図 12(a))．未到着 (図 12(b))，受信順序の入替え (図 12(c)) が発生し得るが，ここでは現時点までの受信信号 y の中で最新のものを推定に用いることにする．また，信号を最初に受信した時点からオブザーバは推定を行うものとし，以下ではそれ以降の場合について考える．

切替え型オブザーバの推定量を

$$\hat{x}_a := \begin{bmatrix} \hat{x}' & \hat{y}'(k-1) & \dots & \hat{y}'(k-h_d) \end{bmatrix}'$$

で定義する．ここで， $\hat{x}_a \in \mathbb{R}^{n+r_1}$, $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$, $\hat{y}(k-d) \in \mathbb{R}^p$ はそれぞれ x_a , x , $\hat{y}(k-d)$ の推定量である．この推定量 \hat{x}_a を用いて，拡大系 (3) に対するオブザーバを

$$\hat{x}_a(k+1) = A_a \hat{x}_a(k) + B_a u(k) + F(d(k)) \{y(k-d(k)) - C_a(d(k)) \hat{x}_a(k)\} \quad (4)$$

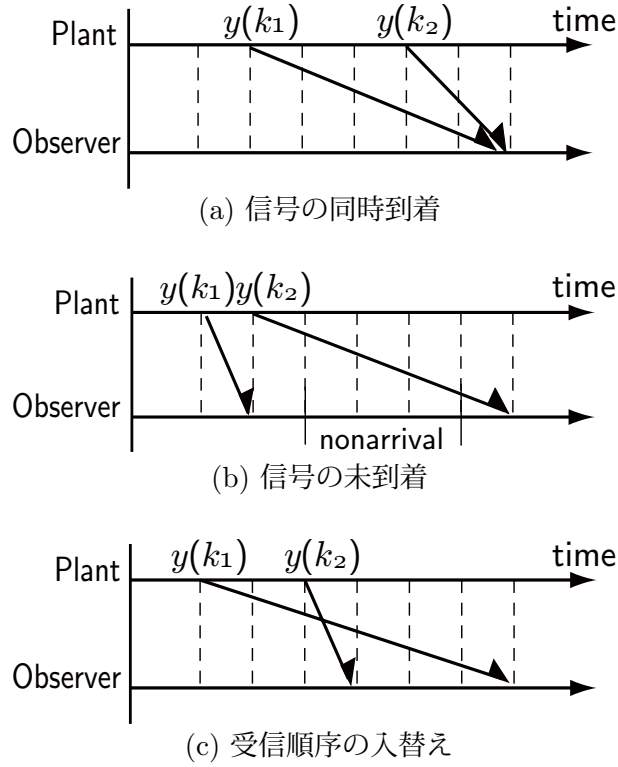


図 12 遅延の影響による受信の種類

で構成する.

つぎに, (3), (4) より推定誤差 $e := x_a - \hat{x}_a$ に関する方程式

$$e(k+1) = \{A_a - F(d(k))C_a(d(k))\}e(k) \quad (5)$$

を得る. $F(\cdot)$, $C_a(\cdot)$ は遅延 d により変化するため, 誤差系 (5) は切替え系である. 本論文では, その安定性が保証されるように, 共通 Lyapunov 関数に基づいてオブザーバを設計する. 本手法を用いることで, 切替え系の各サブシステムの時不変系としての可観測性 (可検出性) が成立すれば推定は可能である [5].

まず, 誤差系 (5) に対する共通 Lyapunov 関数の候補を $V := e'Pe$, $P > 0$ とする. このとき, 対応する Lyapunov 不等式は,

$$\begin{aligned} \{A_a - F(d)C_a(d)\}'P\{A_a - F(d)C_a(d)\} - P < 0, \quad P > 0, \\ d = 0, 1, \dots, h_d \end{aligned} \quad (6)$$

となる. 上記の不等式に対して, Schur complement¹より次式を得る.

$$\begin{bmatrix} -P & P(A_a - F(d)C_a(d)) \\ * & -P \end{bmatrix} < 0, \quad d = 0, 1, \dots, h_d$$

$X(d) := PF(d)$, $d = 0, 1, \dots, h_d$ とおくと, 上式は P , $X(d)$ に関して, $h_d + 1$ 本で連立する LMI

$$\begin{bmatrix} -P & PA_a - X(d)C_a(d) \\ * & -P \end{bmatrix} < 0, \quad d = 0, 1, \dots, h_d \quad (7)$$

へ変換される. (7) を満たす $P > 0$, $X(d)$ が存在するならば, $X(d)$ の定義より

$$F(d) = P^{-1}X(d), \quad d = 0, 1, \dots, h_d \quad (8)$$

よりオブザーバゲイン $F(\cdot)$ が求まる. このとき, つぎの定理が成立する.

定理 1. もし LMI(7) を満たす解 $P > 0$, $X(d)$ が存在するならば, フィードバック則 (8) によって誤差系 (5) は安定化される.

証明

共通 Lyapunov 関数の候補 $V(k) := e'(k)Pe(k)$, $P > 0$ を考える. 誤差系 (5) より V の差分 ΔV に関して次式が成立する.

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &:= V(k+1) - V(k) \\ &= e'(k+1)Pe(k+1) - e'(k)Pe(k) \\ &= e'(k)\{(A_a - F(d(k))C_a(d(k)) - P\}e(k) \end{aligned}$$

Schur complement より LMI(7) は不等式 (6) と等価であること, また, 仮定より (7) を満たす解 P , X_d が存在することから $\Delta V(k) < 0$ が成立する. したがって, 切替え系に対する Lyapunov の安定定理 [28, 29] より誤差系 (5) は安定である. ■

定理 1 より推定誤差 e の零への収束性が保証されるため, 提案手法により状態推定を実現することができる.

¹付録 A を参照のこと.

2.4 減衰率指定による切替え型オブザーバの性能改善

本節では、オブザーバの性能を向上させるために、推定誤差 (Lyapunov 関数) の減衰率を指定し、ゲイン F_d を設計する。減衰率を事前に設定することで、誤差 e の過渡特性の改善が期待できる。

まず、誤差系 (5) に対する共通 Lyapunov 関数の候補 V を $V := e'Pe$, $P > 0$ とし、下式を満たすゲイン $F(\cdot)$ を設計する。

$$V(k+1) < \alpha^2 V(k), \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (9)$$

ここで、 α は V の減衰率を表す。

つぎに、 V の定義より (9) は

$$\begin{aligned} \{A - F(d)C_a(d)\}' \alpha^{-1} P \{A - F(d)C_a(d)\} - \alpha P < 0, \quad P > 0, \\ 0 < \alpha \leq 1 \end{aligned} \quad (10)$$

で表される。(10) は Schur complement よりつぎの行列不等式と等価である。

$$\begin{bmatrix} -\alpha P & P(A - F(d)C_a(d)) \\ * & -\alpha P \end{bmatrix} < 0, \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (11)$$

ここで、 $X(d) := PF(d)$, $d = 0, 1, \dots, h_d$ とおくと、(11) は P , $X(d)$ に関する LMI

$$\begin{bmatrix} -\alpha P & PA - X(d)C_a(d) \\ * & -\alpha P \end{bmatrix} < 0, \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (12)$$

へ変換される。(12) を満たす $P > 0$, $X(d)$ が存在するならば、 $X(d)$ の定義よりゲイン $F(\cdot)$ は

$$F(d) = P^{-1}X(d), \quad d = 0, 1, \dots, h_d \quad (13)$$

から求まる。このように設計したゲイン $F(\cdot)$ からつぎの結果を得る。

定理 2. もし LMI(12) を満たす $P > 0$, $X(d)$ が存在するならば、フィードバック則 (13) によって、減衰率 α の関係式 (9) が成立し、かつ誤差系 (5) が安定化される。

証明 上述より, LMI(12) を満足する $P > 0$, $X(d)$ が存在するならば, (9) が成立する. このとき, $0 < \alpha \leq 1$, $P > 0$ より次式を得る.

$$V(k+1) < \alpha^2 V(k) \leq V(k) \quad (14)$$

(14) から, $V(k+1) - V(k) < 0$, すなわち, Lyapunov 不等式 (6) が成立する. これは, LMI(7) を満たす $P > 0$, $X(d)$ が存在することを意味する. したがって, **定理 1** より誤差系 (5) は安定である. ■

2.5 H_∞ 制御理論に基づく設計

これまではノミナルモデルに対する状態推定について述べてきたが, 実システムにはモデル化誤差, 観測雑音, 入力外乱など未知の不確定要素が含まれている. 本節では, これらの不確定要素を, システムに影響を及ぼすという意味で未知外乱と呼ぶことにし, その抑制を考慮した切替え型オブザーバを設計する.

まず制御対象として,

$$x(k+1) = Ax(k) + B_1 u(k) + B_2 w(k) \quad (15a)$$

$$y(k) = Cx(k) + Dw(k), \quad k \in \mathbb{N} \quad (15b)$$

を考える. $w \in \mathbb{R}^\ell$ は外乱である. 上式より遅延 d を考慮した拡大系は次式で表される.

$$x_a(k+1) = Ax_a(k) + B_{1a}u(k) + B_{2a}w(k), \quad (16a)$$

$$y(k-d(k)) = C_a(d(k))x_a(k) + D_a(d(k))w(k), \quad k \in \mathbb{N}, \quad (16b)$$

$$\begin{aligned}
A_a &= \left[\begin{array}{c|c} A & \mathbf{0}_{q_1 \times r_1} \\ \hline C & [I_{q_2} \quad \mathbf{0}_{q_2 \times p}] \end{array} \right], \quad B_{1a} = \begin{bmatrix} B_1 \\ \mathbf{0}_{r_1 \times m} \end{bmatrix}, \quad B_{2a} = \begin{bmatrix} B_2 \\ D \\ \mathbf{0}_{r_4 \times \ell} \end{bmatrix}, \\
C_a(d) &= \begin{cases} \begin{bmatrix} C & \mathbf{0}_{p \times r_1} \end{bmatrix} & \text{if } d = 0 \\ \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{p \times r_2} & I_p & \mathbf{0}_{p \times r_3} \end{bmatrix} & \text{if } d = 1, 2, \dots, h_d, \end{cases} \\
D_a(d) &= \begin{cases} D & \text{if } d = 0 \\ \mathbf{0}_{p \times \ell} & \text{if } d = 1, 2, \dots, h_d, \end{cases} \\
q_1 &= n + p, \quad q_2 = p(h_d - 1), \\
r_1 &= ph_d, \quad r_2 = n + pd - p, \quad r_3 = p(h_d - d), \quad r_4 = p(h_d - 1)
\end{aligned}$$

拡大系 (16) に対する切替え型オブザーバは

$$\hat{x}_a(k+1) = A_a \hat{x}_a(k) + B_{1a} u(k) + F(d(k)) \{y(k-d(k)) - C_a(d(k)) \hat{x}_a(k)\} \quad (17)$$

と記述される. (16), (17) より誤差系

$$e(k+1) = \{A_a - F(d(k))C_a(d(k))\}e(k) + \{B_{2a} - F(d(k))D_a(d(k))\}w(k) \quad (18)$$

を得る. 前節と同様に誤差系 (18) は切替え系であり, その安定性を保証する必要がある. 一方, 外乱 w による影響を抑えるために, つぎの評価出力を与える.

$$z(k) = W_e e(k) \quad (19)$$

W_e は適当なサイズの数値行列である. 以上の準備のもとで, 安定性および外乱抑制を考慮したオブザーバを設計する. これに関して, 以下の定理が成立する.

定理 3. $\gamma > 0$ が与えられたとする. もし $P > 0$, $X(d)$ に関する LMI

$$\begin{bmatrix} -P + W_e' W_e & 0 & A_a' P - C_a(d)' X(d)' \\ * & -\gamma^2 I & B_{2a}' P - D_a(d)' X(d)' \\ * & * & -P \end{bmatrix} < 0, \quad (20)$$

$$d = 0, 1, \dots, h_d$$

を満たす解が存在するならば、フィードバック則 $F(d) = P^{-1}X(d)$ によって誤差系 (18) は安定化され、かつ

$$\|z\|_{\ell_2} \leq \gamma \|w\|_{\ell_2} + \beta \quad (21)$$

が満足される。 β は非負の定数である。

証明 まず安定性について示す。 (20) に対して、Schur complement を適用し、次式を得る。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -P + W_e' W_e & 0 \\ * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \\ & - \begin{bmatrix} A_a' P - C_a(d)' X(d)' \\ B_{2a}' P - D_a(d)' X(d)' \end{bmatrix} (-P)^{-1} \begin{bmatrix} A_a' P - C_a(d)' X(d)' \\ B_{2a}' P - D_a(d)' X(d)' \end{bmatrix}' < 0 \\ & \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \{A_a - F(d)C_a(d)\}' P \{A_a - F(d)C_a(d)\} - P + W_e' W_e & * \\ * & \begin{bmatrix} \{A_a - F(d)C_a(d)\}' P \{B_{2a} - F(d)D_a(d)\} \\ \{B_{2a} - F(d)D_a(d)\}' P \{B_{2a} - F(d)D_a(d)\} - \gamma^2 I \end{bmatrix} \end{bmatrix} < 0 \quad (22) \end{aligned}$$

再び Schur complement により

$$\begin{bmatrix} \{A_a - F(d)C_a(d)\}' P \{A_a - F(d)C_a(d)\} - P & * & * \\ * & \begin{bmatrix} \{A_a - F(d)C_a(d)\}' P \{B_{2a} - F(d)D_a(d)\} & W_e' \\ \{B_{2a} - F(d)D_a(d)\}' P \{B_{2a} - F(d)D_a(d)\} - \gamma^2 I & 0 \end{bmatrix} & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (23)$$

を得る。ここで、共通 Lyapunov 関数の候補を $V := e' P e$ としたとき、(23) の (1, 1) ブロックは Lyapunov 不等式に相当する。 よって (20) を満たす $P > 0$, $X(d)$, $d =$

$0, 1, \dots, h_d$ が存在するならば、誤差系 (18) は安定である。つぎに (22) 式より

$$\begin{bmatrix} e \\ w \end{bmatrix}' \begin{bmatrix} \{A_a - F(d)C_a(d)\}'P\{A_a - F(d)C_a(d)\} - P + W_e'W_e \\ * \\ \{A_a - F(d)C_a(d)\}'P\{B_{2a} - F(d)D_a(d)\} \\ \{B_{2a} - F(d)D_a(d)\}'P\{B_{2a} - F(d)D_a(d)\} - \gamma^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ w \end{bmatrix} < 0$$

が成り立つ。上式を展開し、(18), (19) より次式を得る。

$$V(k+1) - V(k) + z'(k)z(k) - \gamma^2 w'(k)w(k) < 0$$

これより

$$\begin{aligned} & -V(0) + \sum_{k=0}^K z'(k)z(k) - \gamma^2 \sum_{k=0}^K w'(k)w(k) < 0 \\ \Leftrightarrow & \sum_{k=0}^K z'(k)z(k) < \gamma^2 \sum_{k=0}^K w'(k)w(k) + V(0) \end{aligned}$$

となる。 $K \rightarrow \infty$ のとき次式が成立する。

$$\|z\|_{\ell_2}^2 \leq \gamma^2 \|w\|_{\ell_2}^2 + V(0)$$

ここで、不等式 $(a^2 + b^2)^{1/2} \leq a + b$, $a, b > 0$ を用いると次式を得る。

$$\|z\|_{\ell_2} \leq \gamma \|w\|_{\ell_2} + (V(0))^{1/2}$$

$\beta = (V(0))^{1/2}$ とおくことで、(21) が成立する²。 ■

本定理より切替え型オブザーバを設計することで、外乱抑制の度合いが γ を用いた評価式 (21) で表される。

² $e(0) = 0$ のとき $V(0) = 0$ となり、 ℓ_2 ノルムでの入出力比 $\|z\|_{\ell_2} \leq \gamma \|w\|_{\ell_2}$ が成り立つ [2].

2.6 数値シミュレーション

2.6.1 定理 1 に基づく設計

ここでは、切替え型オブザーバを用いた推定の数値例を示す。制御対象は、入力 (印加電圧) から出力 (回転角) までの伝達関数が、

$$P(s) = \frac{49}{s(s + 9.8)}$$

で記述される文献 [14] の DC モータである。

本数値例では、観測信号 (回転角) が遅延を伴って伝送される場合を考える。遅延時間は最大値 90ms ($h_d = 9$) の一様分布とし、その推移を図 13 に示す。

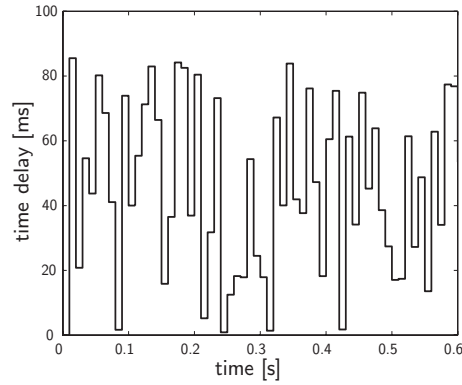


図 13 伝送遅延時間の推移

サンプリング周期を 10ms として、零次ホールドにより離散化し、制御入力を $u = 3 \cos(100t)$ とする。

定理 1 を用いて設計した場合の結果を図 14 に示す。同図の実線および破線は、それぞれ回転角の真値とその推定量であり、時間が経過するにつれて、推定量が状態量に一致することがわかる。したがって、遅延時間が変動する系に対して、ゲイン切替え型オブザーバの有効性を確認できる。

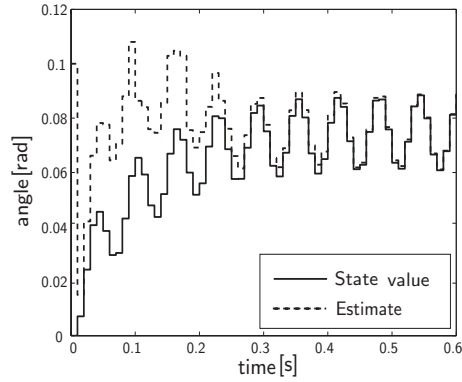


図 14 推定結果 (定理 1 に基づく設計)

2.6.2 減衰率指定による設計

次に, 2.4 節で述べた減衰率を考慮した場合と比較する. 減衰率は $\alpha = 0.85 < 1$ と指定した場合の結果を図 15 に示す. 同図より前節の結果と同様の傾向が得られており, この場合も本手法により状態推定が可能であることがわかる.

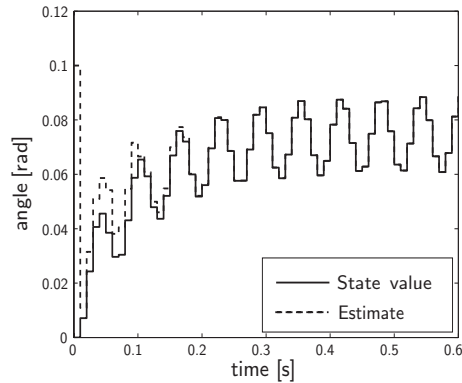


図 15 推定結果 (減衰率指定)

また, 推定誤差の時間応答を図 16 に示す. 実線および破線はそれぞれ $\alpha = 1, 0.85$ の場合である. なお, $\alpha = 1$ の場合は, **定理 1** に基づく設計, すなわち減衰率を指定しない設計に対応している. 同図より, 減衰率指定を行うことで, 推定誤差の過渡特性が改善されていることがわかる.

注意 1. この例では, LMI(7) の $X(d)$, $d = 0, 1, \dots, h_d$ を共通 ($X(d) = X(\text{const})$) にした単一ゲインの設計問題も可解であった. この単一ゲインのオブザーバは,

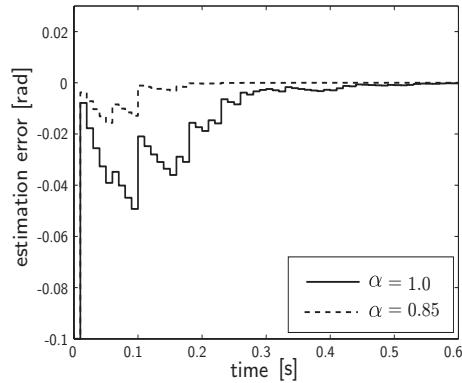


図 16 推定誤差 (減衰率指定)

$F(0) = F(1) = \dots = F(h_d) = P^{-1}X$ をもつ切替え型オブザーバの特殊例であり、第 1 章で述べた単一ゲイン型の設計によるものである。また、ジッタバッファにより受信信号を最大遅延 h_d までバッファリングすることで、時不変な拡大系を構成し、オブザーバを設計することもできる。これらの手法を用いたときの推定誤差を図 17 に示す (伝送遅延は図 13 に示されたものである)。

同図の実線および破線は、誤差の収束が速い順に、減衰率指定 ($\alpha = 0.85$) で設計された切替え型オブザーバ、減衰率を付加していない ($\alpha = 1$) 切替え型オブザーバ、単一ゲイン型のオブザーバ、ジッタバッファを用いた場合である。単一ゲインやジッタバッファの場合は、最大遅延時間 h_d にあわせてゲインを設計するので、位相遅れの影響から結果的にローゲイン傾向となり、過渡特性が悪化していることが分かる。したがって、ゲイン切替え型の設計により、推定誤差の収束速度を改善することができる。

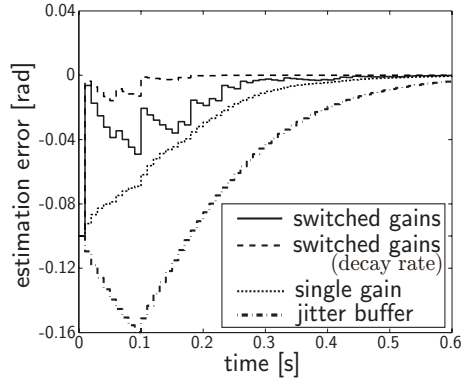


図 17 推定誤差の推移

2.6.3 H_∞ 設計

ここでは、DC モータの出力信号 (回転角) に観測雑音が混在するを考え、その影響を抑制した推定をおこなう。雑音は制御対象 (15) の未知外乱 w に対応しており、外乱項の係数行列は $B_2 = [0 \ 0]'$ 、 $D = 1$ である。また、 w は平均 0、分散 0.1 の白色雑音とする。

評価出力 (19) の重みを $W_e = [1 \ 0_{1 \times 11}]$ 、 $\gamma = 4.07$ と選択し、**定理 3** より切替え型オブザーバを設計した。その他の条件は前節と同じである。

このときの推定誤差を図 18 に示す。同図より外乱を考慮していない**定理 1**の設計に比べて、雑音の影響は抑制されていることがわかる。

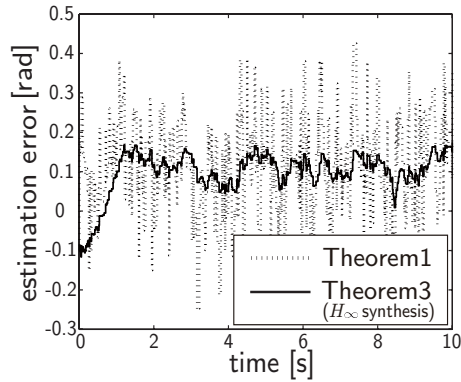


図 18 推定誤差 (H_∞ 設計)

2.7 オフライン推定実験

2.7.1 実験方法

図 19 に示すような倒立振り子系の状態推定をおこなう．本実験では，まず安定化された振子の観測出力 (台車位置，振り子角度) と制御入力 (印加電圧) の時系列データを記録する．得られた出力に対して，一台の計算機内で仮想的に遅延を付加し，オフラインで推定をおこなった (図 20)．遅延には NIST Net[25] で生成されたものを使用しており，その最大値は 110ms($h_d = 11$) である (図 21)．

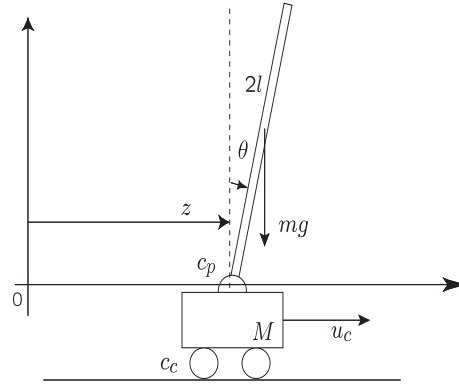


図 19 倒立振り子系

倒立振り子の連続時間の状態方程式を次式で記述される．

$$\dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + B_c u_c(t), \quad (24a)$$

$$y_c(t) = C_c x_c(t), \quad (24b)$$

$$x_c = [z, \theta, \dot{z}, \dot{\theta}]',$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{m^2 l^2 g}{F} & -\frac{(J+ml^2)(c_c a^2 R + K_m^2 K_g^2)}{F a^2 R} & \frac{m l c_p}{F} \\ 0 & \frac{(M+m) m l g}{F} & \frac{m l (c_c a^2 R + K_m^2 K_g^2)}{F a^2 R} & -\frac{(M+m) c_p}{F} \end{bmatrix},$$

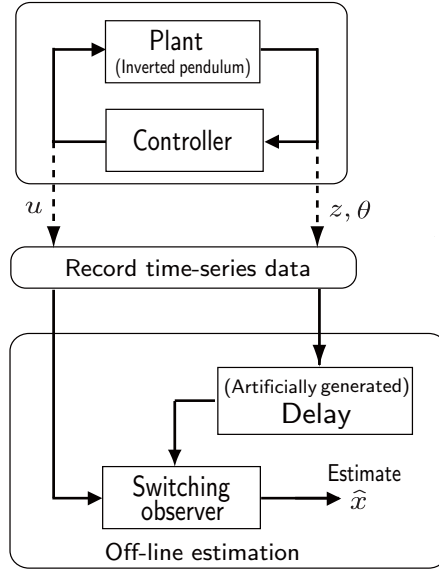


図 20 推定実験の流れ

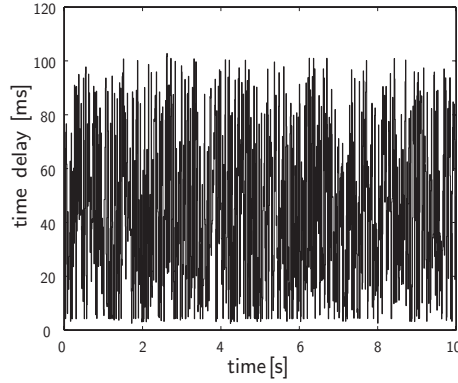


図 21 遅延時間の推移 (オフライン推定)

$$B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{(J+ml^2)K_mK_g}{FaR} \\ -\frac{mlK_mK_g}{FaR} \end{bmatrix}, \quad C_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad F = (M+m)J + Mml^2$$

$z, \theta, \dot{z}, \dot{\theta}, u_c$ はそれぞれ台車位置, 振り子角度, 台車速度, 振り子角速度, 印加電圧である。倒立振り子のパラメータを表 1 に示す。

サンプリング周期 10ms として, 倒立振り子系 (24) を零次ホールドにより離散化する。また, 減衰率 $\alpha = 1$ と指定し, 切替え型オブザーバを設計した。

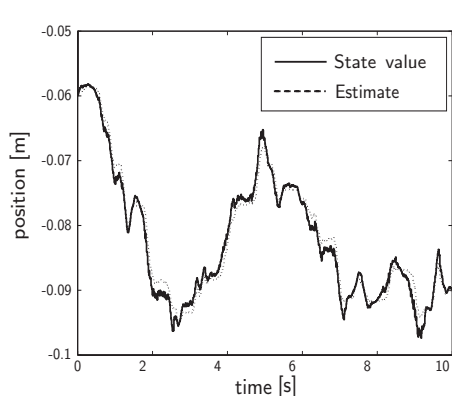
表 1 倒立振子のパラメータ

K_m	torque constant	$0.00767 \text{ V/rad sec}^{-1}$
R	armature resistance	$2.6 \text{ } \Omega$
K_g	gear ratio	3.7
a	radius of pinion	0.00635 m
M	mass of cart	0.895 kg
$2l$	length of pendulum	0.628 m
m	mass of pendulum	0.215 kg
g	gravity acceleration	9.8 m/sec^2
J	inertia moment of pendulum	0.0076 N m sec^2
c_p	viscous friction of rotation axis for pendulum	8.4779 N m sec
c_c	viscous friction of cart	0.001384 N sec/m

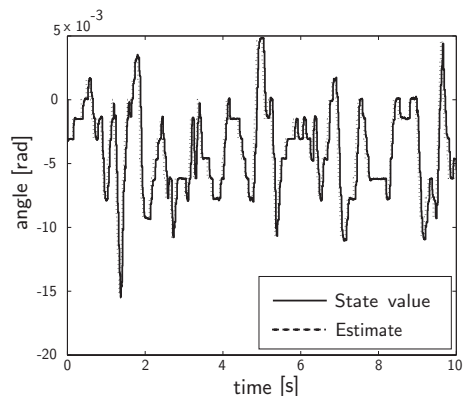
2.7.2 実験結果

推定量と状態量の時間応答を図 22 に示す．本実験装置では速度 \dot{z} と角速度 $\dot{\theta}$ を直接計測できなかったため，参考として位置 z と角度 θ の差分近似値を掲載している．

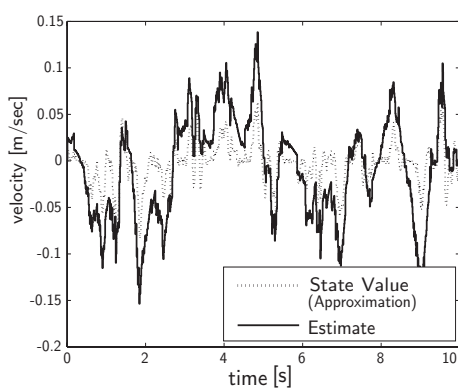
同図より速度 \dot{z} と角速度 $\dot{\theta}$ では，近似計算の影響で推定誤差が残るものの，その他に関しては精度良く状態推定できていることが分かる．以上のことから，切替え型オブザーバにより不規則遅延の影響が補償される．



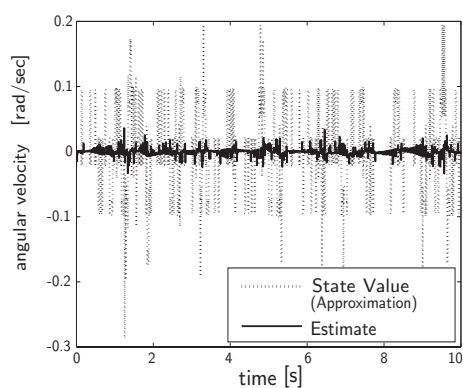
(a) 台車位置



(b) 振子角度



(c) 台車速度



(d) 振子角速度

図 22 実験結果 (オフライン推定)

2.8 本章のまとめ

本章では、ネットワーク制御系の遅延補償方法として、タイムスタンプを用いたゲイン切替え型オブザーバを提案した。対象とするシステムは C 行列が時変の拡大系として定式化されるため、オブザーバ設計が切替えを伴う誤差系の安定化問題に帰着することを述べた。さらに、共通 Lyapunov 関数の減衰率を指定した設計方法も述べ、数値例により推定誤差の過渡特性が改善されることを確認した。また、未知外乱の影響を抑制するために、 H_∞ 制御理論に基づく設計方法も述べた。最後に、オフライン推定実験による性能評価をおこない、提案法の有効性を確認した。

3. 実ネットワークを介した複数機器の連動

3.1 本章の概要

近年のイーサネット機器の低価格化により、産業用計装機器にもネットワークポートが標準装備されるようになってきた。これを背景に、複数のロボット工作機械が、通信路を介してリアルタイムに情報をやりとりしながら生産・加工作業を行うことが検討されつつある。このような作業としては、例えば、ワークの挙動に合わせて複数の工作機器が連動する加工作業 (図 23) 等が挙げられる。また、文献 [7] の作業に対して、ネットワーク越しに同期した複数カッタによるシェービング加工への拡張が考えられる。このような作業においては、機器同士の正確

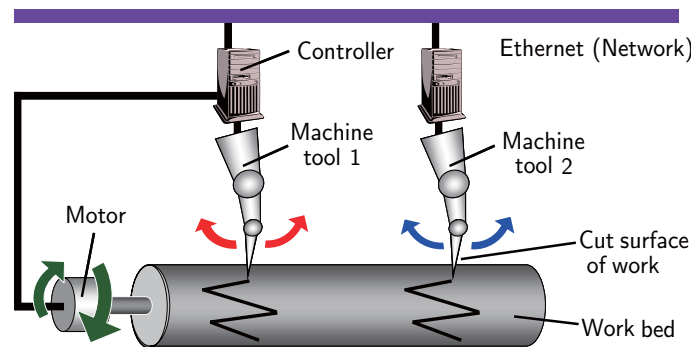


図 23 複数工作機器による加工作業

な連動が重要であるが、汎用のネットワークを使用する際には、不規則な伝送遅延の発生が不可避であるため、その影響を補償する必要がある。そこで本章では、切替え型オブザーバを複数機器の連動に応用し、遅延の影響を補償する。

しかし、前章では実プラント (倒立振子系) から採取したデータに仮想的な遅れを付加した条件下でのオフライン動作を確認したにとどまり、実用上の有用性を検証するに至っていない。ここでは、提案法の実際のネットワーク遅延補償問題に対する有用性を示すことを目的とし、そのために必要となる諸問題の解決方法を具体的に示す。

そもそも切替え型オブザーバはタイムスタンプを用いるため、事前に送受信側で計算機時刻を同期させる必要がある。そこで 3.2 節では、計算機の時刻誤差の実

測・補正を行い，タイムスタンプの実用上の有効性について検討する．ここでは，サンプル周期が ms オーダのメカトロ系の制御を考え，1 ms 以内の同期を目標とする．この場合には GPS などの追加ハードウェアによる数百 μ s オーダーの高精度な補正 [17, 18] は不要であり，Network Time Protocol (NTP) [20, 21, 22, 23, 24] を用いたソフトウェア的な補正で十分と考えられる (図 24)．

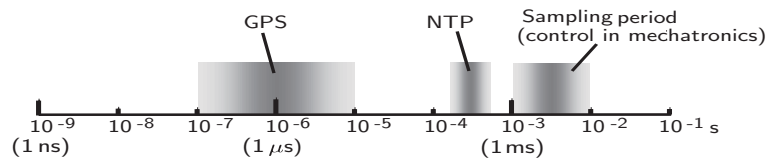


図 24 時刻同期精度および制御サンプル周期の時間スケール

3.3 節では，タイムスタンプによる遅延計測が実用的であることを踏まえ，切替え型オブザーバによる複数機器の連動について述べる．本オブザーバを用いることで，不規則な時変の遅延が発生する場合にも，各制御系では遅延を考慮しない従来の PI 補償器等により連動が比較的容易に達成される．3.4 節では，実ネットワークを用いた検証を行い，提案法の有効性を示す．さらに，3.5 節では，ネットワークに負荷を与えた場合での検証をおこない，3.6 節でまとめとする．

3.2 計算機時刻の同期

本節ではまず計算機内の時刻管理の概要を述べる．そして，本論文の予備的事項として時刻誤差を実測し，その結果を踏まえ，時刻同期の方法を述べる．

3.2.1 計算機時計の概要

計算機には，ハードウェアクロック (またはリアルタイムクロック) とソフトウェアクロック (またはシステムクロック) の二種類がある [13, 15, 16, 18]．ハードウェアクロックは，マザーボード上に設置された時計であり，水晶振動子を用いた発振回路の出力から時刻をカウントする．一方，ソフトウェアクロックは，OS 起動中にのみ存在する時計である．起動時にハードウェアクロックから時刻

を読み込み、その情報がある変数に保存する。その後はタイマ割り込みをおこない、変数を逐次更新する。一旦ハードウェアクロックから読み込みが行われると、その後システムはソフトウェアクロックの値を参照する。このため、タイムスタンプにはソフトウェアクロックの情報が用いられる。タイマ割り込みに用いる水晶自体のばらつきにより、割り込みのタイミングがずれ、ソフトウェアクロックに誤差が累積する。

3.2.2 時刻誤差の測定

まず指定した時刻に、二台の計算機(以下、計算機 a , b) から同時に階段状に変化する三角波を出力させる(図 25)。電圧値は 10 ms 毎に更新され(図 26)、その様子をオシロスコープで観測した。

なお D/A ボードには、変換時間が 10 μ s のものを使用しているため、出力波形に対する変換時間の影響は無視できる。また、計算機の OS には RT-Linux を使用しており、波形出力プログラムは十分高い精度をもってリアルタイム動作している。観測の際に、計算機間で時刻誤差があると電圧を変化させるタイミングが一致せず、図 26 のように位相差が発生する。この位相差が時刻誤差に対応する。

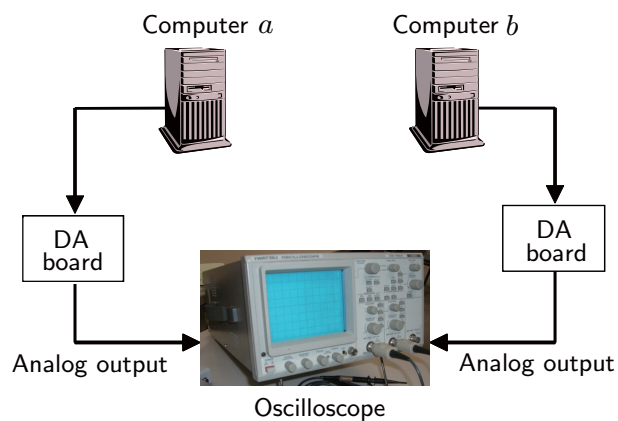


図 25 時刻誤差の計測方法

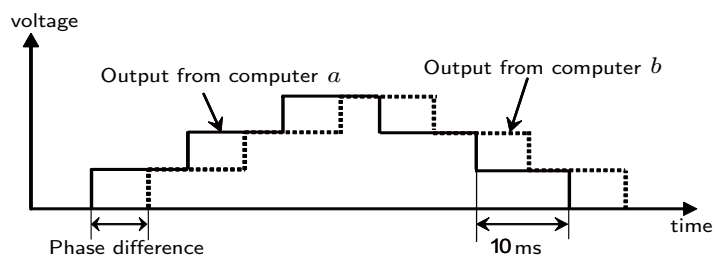
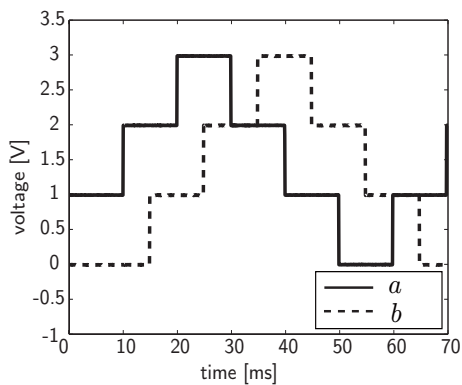
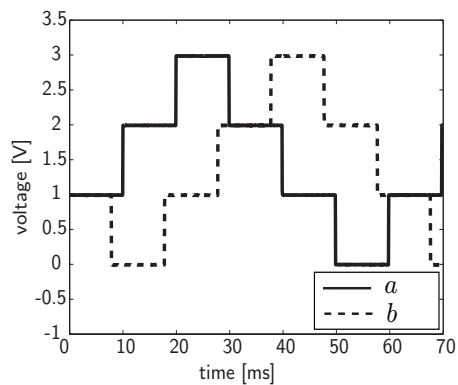


図 26 計算機時刻の誤差

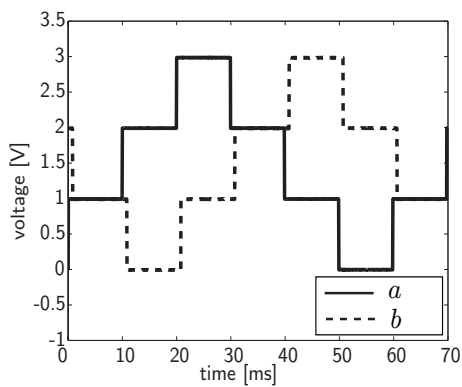
実験結果を図 27 に示す．同図は，計算機 *a* の出力 (実線) を基準として，計算機 *b* からの波形 (破線) の推移を表している．結果から，位相差が増加していることがわかる．



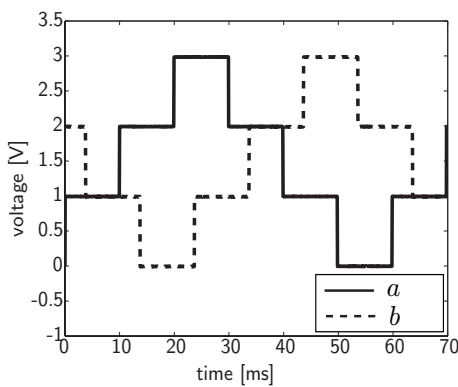
(a) 計測開始時点



(b) 23 秒後



(c) 36 秒後



(d) 54 秒後

図 27 位相差

また、位相差の時間変化を表したものが図 28 である。同図より、位相差は経過時間に対して直線的に変化する。この現象は、二台の計算機時刻の不一致により発生するクロックスキュー [4] である。したがって、図 28 の直線に相当する時刻更新速度の誤差、および切片に対応する初期誤差を補正する必要がある。

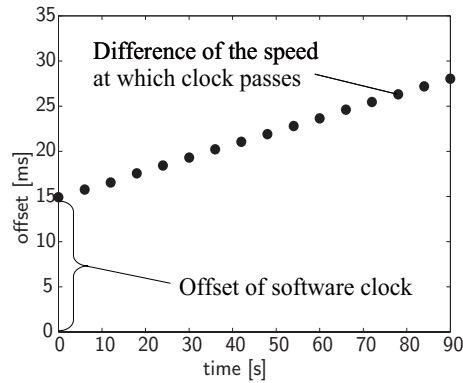


図 28 位相差 (時刻誤差) の時間変化

3.2.3 時刻誤差への補正

まず時刻更新速度の誤差について検討する．前述の結果より位相差は単位時間あたり $r_d = 1.449 \times 10^{-4}$ の割合で増加している．誤差の原因として，水晶自体の個体差および動作周波数の温度特性によるものが考えられるが，外気温に対して水晶の動作周波数の変動は数十 ppm (parts per million, 1 ppm あたり 100 万分の 1 に相当) 程度であり [13, 18, 19], r_d と比べてその影響は小さい．したがって，時刻更新速度の誤差は個体差に起因すると考えられ，周波数は時不変とみなせる．そこで，以下に示すオフラインの補正を行う．

まず，前述の結果より計算機 b の時刻は a よりも更新速度が遅いことがわかる．両計算機の更新速度を一致させるために，計算機 a のサンプル周期 h に対して計算機 b のサンプル周期を $(1 - r_d)h$ とする．図 29 は補正後の時刻誤差であり，同図より時刻誤差が一定となることが分かる．

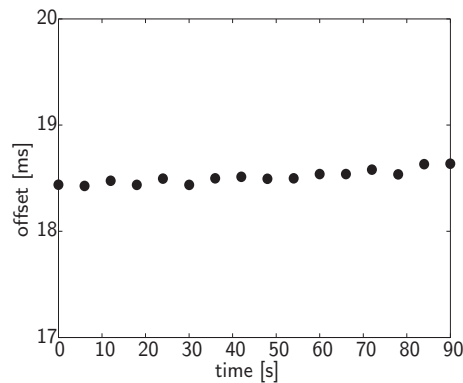


図 29 サンプルング周期補正後の時刻誤差

初期誤差の補正には NTP を用いる．補正手順は以下の通りである．

Step 1 クライアントが現在時刻をサーバへ問合せる

Step 2 サーバが問合せの信号を受信し，サーバ内のソフトウェアクロックの時刻を返答する

Step 3 クライアントが返答を受信後，現在時刻を予測する³．

Step 4 予測した時刻をもとにクライアントが自身のソフトウェアクロックを補正し，サーバの時刻と同期をとる

図 30 は NTP のタイムチャートである． T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , δ は，それぞれクライアントからの問合せの送受信時刻，サーバからの返答の送受信時刻，初期誤差を表す．

問合せおよび返答の伝送遅延時間 d_1 , d_2 に関して，次式が成立する．

$$d_1 = T_2 - (T_1 + \delta),$$

$$d_2 = (T_4 + \delta) - T_3$$

³返答の際に伝送遅延が発生するため，予測される時刻は，Step 2 で得られるサーバの計算機時刻と異なる

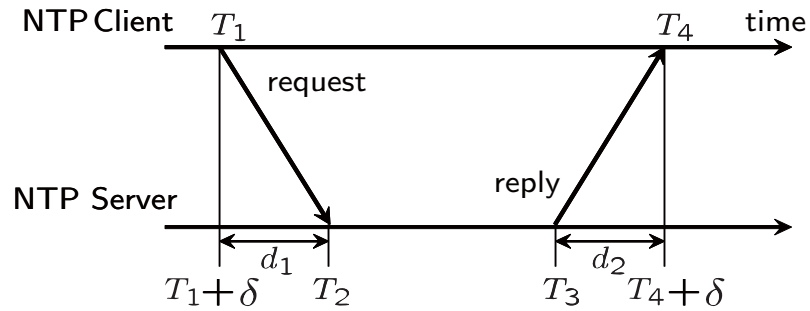


図 30 NTP による補正のタイムチャート

上式より，初期誤差 δ は次式で表される．

$$\delta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3) - (d_1 - d_2)}{2}$$

NTP では $d_1 = d_2$ と仮定されているため，ここではネットワークの利用状況が低負荷の場合において時刻を同期させるものとする．

つぎに，計算機 a , b を NTP サーバ，クライアントに設定し，時刻同期を行う．なお，前述のとおり計算機 b のサンプル周期を修正し，時刻更新速度の誤差を補正している．

図 31, 32 は，それぞれ NTP による同期前後の位相差，同期後の時刻誤差を示しており，その精度は約 0.7ms であった．この結果より，計算機時刻を必要な精度内で同期させることができ，タイムスタンプを活用した遅延計測が実際に可能であると考えられる．

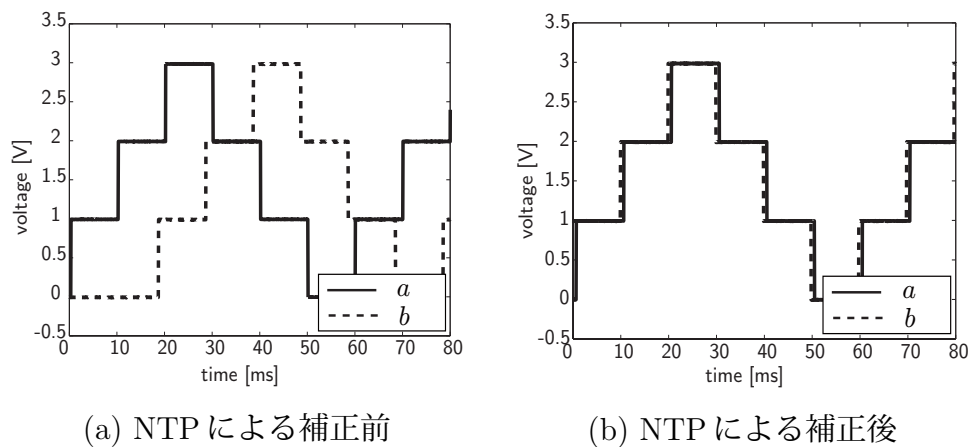


図 31 NTP による補正

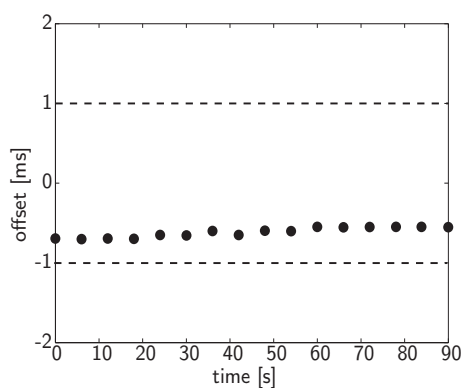


図 32 NTP 実施後の時刻誤差

3.3 切替え型オブザーバを用いた連動

3.3.1 対象とするシステム

図 23 の加工作業を想定する．これは，図 33 に示すようにモデル化でき，三つの線形時不変離散時間系 S_i , $i = 1, 2, 3$ で構成されている． S_1 の状態方程式は

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Br(k), \\ y_1(k) &= Cx(k), \quad k \in \mathbb{N} \end{aligned}$$

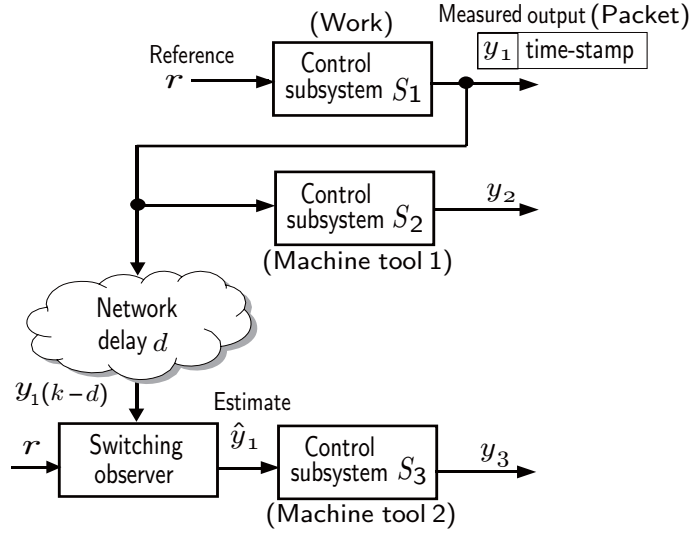


図 33 ネットワークを介した連動システム

で与えられるものとする． $x \in \mathbb{R}^n$, $r \in \mathbb{R}^p$, $y_1 \in \mathbb{R}^p$ はそれぞれ状態量，参照値，観測出力であり， (C, A) は可観測とする．

ここでは，連動の最も簡単な例として制御系 S_2 , S_3 の応答を制御系 S_1 の応答に追従させることを考える．連動を達成するために， S_1 の観測出力 y_1 が制御系 S_2 , S_3 へ逐次送信され，各制御系への参照値として与えられる．制御系 S_1 , S_2 は同一の計算機上に実装されており，その間の伝送遅延は零と仮定する． S_2 では，適切なサーボ系を設計することで制御系 S_1 との連動が可能である．

一方，制御系 S_3 への通信にはネットワークが用いられるため，伝送遅延が発生する．第 2 章と同様に，サンプル時刻 kh , $k \in \mathbb{N}$ において S_3 で受信された y_1 の遅延時間を $d(k)$ と表し，**仮定 1** が成立する．図 33 で示される系には時変な遅延 d が含まれるため，一般に S_3 が S_1 に連動することは困難である．そこで，不規則遅延による影響を補償するために，前述のタイムスタンプを用いて，制御系 S_3 で y_1 の遅延を計測し，その遅延時間に基づいて切替え型オブザーバにより S_1 の状態を推定する．

以下本論文では，参照値 r が予め与えられている場合を想定し，事前に切替え型オブザーバに送信したパターンを S_1 と同時刻に与える．したがって， r のみが遅延なく伝送されることを想定しているわけではない．3.4 節以降の実験につい

ても同様である．なお，オンラインで r を与える場合については，付録 B を参照のこと．

3.3.2 切替え型オブザーバの設計

まず制御系 S_1 に対して，信号の伝送遅延を考慮した以下の拡大系を考える．

$$x_a(k+1) = A_a x_a(k) + B_a r(k), \quad (25a)$$

$$y_1(k-d(k)) = C_a(d(k)) x_a(k), \quad k \in \mathbb{N}, \quad (25b)$$

$$\begin{aligned} x_a &= \begin{bmatrix} x' & y_1'(k-1) & \cdots & y_1'(k-h_d) \end{bmatrix}', \\ A_a &= \left[\begin{array}{c|c} A & \mathbf{0}_{q_1 \times r_1} \\ \hline C & [I_{q_2} \quad \mathbf{0}_{q_2 \times p}] \end{array} \right], \quad B_a = \begin{bmatrix} B \\ \mathbf{0}_{r_1 \times p} \end{bmatrix}, \\ C_a(d) &= \begin{cases} \begin{bmatrix} C & \mathbf{0}_{p \times r_1} \end{bmatrix} & \text{if } d = 0 \\ \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{p \times r_2} & I_p & \mathbf{0}_{p \times r_3} \end{bmatrix} & \text{if } d = 1, 2, \dots, h_d, \end{cases} \\ q_1 &= n + p, \quad q_2 = p(h_d - 1), \\ r_1 &= p h_d, \quad r_2 = n + p d - p, \quad r_3 = p(h_d - d) \end{aligned}$$

ここで， $y(k-d)$ ， $d = 1, 2, \dots, h_d$ は，遅延を伴った S_1 の観測信号 y_1 を意味する．この拡大系 (25) に対する切替え型オブザーバは次式で記述される．

$$\hat{x}_a(k+1) = A_a \hat{x}_a(k) + B_a r(k) + F(d(k)) \{y_1(k-d(k)) - C_a(d(k)) \hat{x}_a(k)\}, \quad (26a)$$

$$\hat{y}_1(k) = G_a \hat{x}_a(k), \quad k \in \mathbb{N}, \quad (26b)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_a &= \begin{bmatrix} \hat{x}' & \hat{y}_1'(k-1) & \cdots & \hat{y}_1'(k-h_d) \end{bmatrix}', \\ G_a &= \begin{bmatrix} C & \mathbf{0}_{p \times r_1} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$\hat{x}_a \in \mathbb{R}^{n+r_1}$ ， $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ ， $\hat{y}_1(k-d) \in \mathbb{R}^p$ はそれぞれ x_a ， x ， $y_1(k-d)$ の推定量である． d はタイムスタンプにより得られ，ゲイン $F(\cdot)$ は d に応じて切替えるものと

する。そして、(26b) より \hat{x} から要素 \hat{y}_1 が取り出され、制御系 S_3 への参照値として与えられる。

つぎに、(25), (26) より推定誤差 $e := x_a - \hat{x}_a$ に関する方程式

$$e(k+1) = \{A_a - F(d(k))C_a(d(k))\}e(k), \quad k \in \mathbb{N} \quad (27)$$

を得る。 $F(\cdot)$, $C_a(\cdot)$ は遅延 d により変化するため、誤差系 (27) も切替え系である。その安定性を保証するゲインの設計に関しては、前章同様に **定理 1** が成立するため、本オブザーバにより $\hat{y}_1 \rightarrow y_1$ ($k \rightarrow \infty$) となることが保証される。

したがって、切替え型オブザーバの出力に対して、良好な追従特性を達成する制御器を設計することで、全ての制御系の連動が可能となる。

3.3.3 予備実験

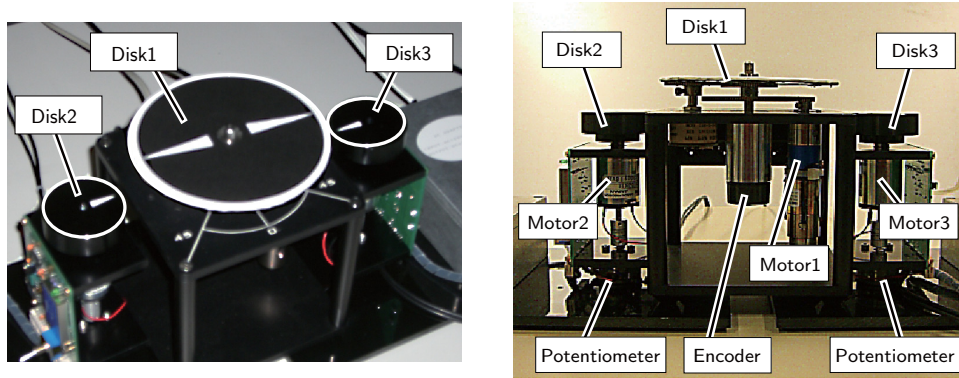


図 34 円盤駆動型 DC モータ (左: 真上図, 右: 正面図)

実ネットワークを用いた検証の予備実験として、一台の計算機内で仮想的に遅延を発生させた場合で、連動の実験を行い、提案法の有効性を検証する。制御対象は、円盤を駆動する DC モータ M_i , $i = 1, 2, 3$ である (図 34)。目的はモータ M_1 の回転角に対して、モータ M_2, M_3 が追従することであり、モータ M_i , $i = 1, 2, 3$ が図 33 の制御系 S_i のプラントに対応する。目的は、伝送遅延を伴う環境下でモータ M_1 の回転角に対して、モータ M_2, M_3 が追従することである。図 35 に実験装置の構成を示す。 M_1 の観測信号 (モータ回転角) が M_2, M_3 へ送信される。 M_2

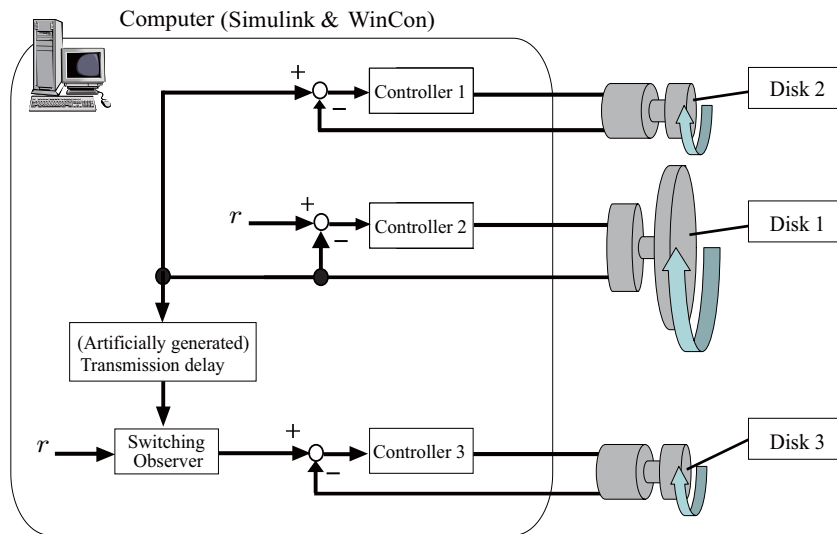


図 35 実験装置の構成 (予備実験)

へは遅延なしで信号が受信される．一方，モータ M_3 には遅れを伴って信号が受信され，切替え型オブザーバにより M_1 の回転角がオンラインで推定される．本実験では一台の計算機内で，三つの制御器を実装し，擬似的に伝送遅延を発生させた．

遅延時間は最大値 50ms ($h_d = 5$) の一様分布とし，その推移を図 36 に示す．なお，本実験では MATLAB Simulink および WinCon5.0 を採用した．モータ M_i の

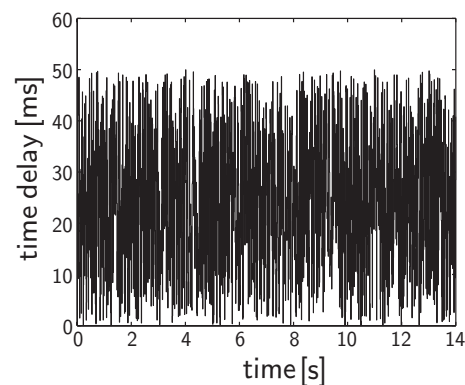


図 36 遅延時間の推移 (予備実験)

制御入力および観測出力は，それぞれ印加電圧と回転角であり，その伝達関数は

次式で記述される.

$$P_i(s) = \frac{1}{s(sa_i + b_i)}, \quad i = 1, 2, 3$$

また, 制御器には PI 補償器

$$C_i(s) = K_{Pi} + \frac{K_{Ii}}{s}, \quad i = 1, 2, 3$$

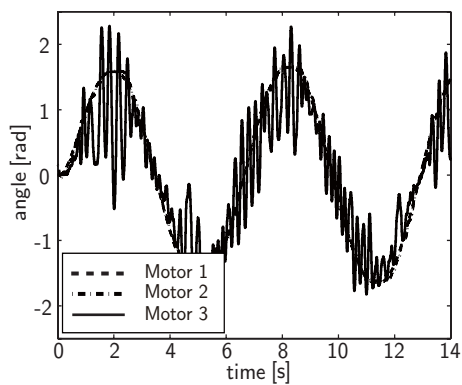
を用いる. パラメータ a_i , b_i , K_{Pi} , K_{Ii} を表 2 に示す. a_i , b_i の値は周波数応答による同定から得られたものである. サンプル周期を 10ms として, 零次ホールドにより離散化する. また参照値を $r(t) = 1.5 \sin(t)$ とする. 以上の設定のもとで, 切替え型オブザーバを**定理 1** より設計した.

表 2 DC モータと PI 補償器のパラメータ

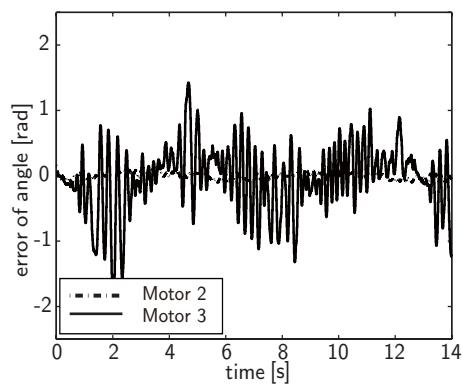
DC motor		PI controller	
a_1	0.4576	K_{P1}	2.0
b_1	1.2029	K_{I1}	1.0
a_2	0.0125	K_{P2}	15.0
b_2	0.1924	K_{I2}	2.0
a_3	0.0201	K_{P3}	15.0
b_3	0.2915	K_{I3}	2.0

切替え型オブザーバを未使用／使用の場合の結果を, 図 37-38 に示す. 同図の (a), (b) はそれぞれモータ回転角およびモータ M_1 に対する M_2 , M_3 の追従誤差である. M_1 からの観測信号は, M_2 に遅延なしで受信されるため, M_2 の回転は M_1 に同期することがわかる.

オブザーバを使用していない場合, 遅延の影響によりモータ M_3 の追従特性が悪化していることが確認できる. 一方, オブザーバを用いることで, 追従誤差が小さくなり, また推定誤差の推移 (図 39) も良好な結果であることがわかる.

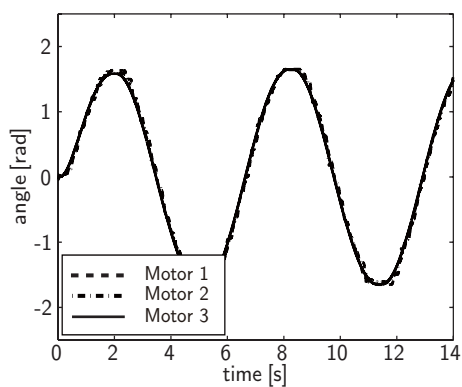


(a) モータ回転角

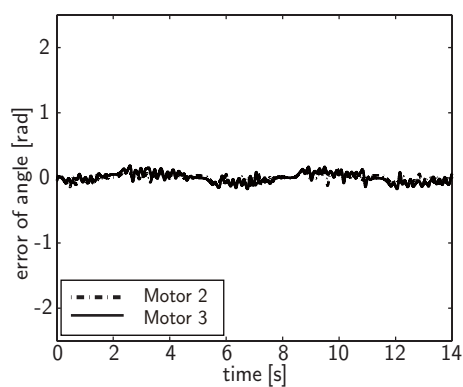


(b) モータ M_2/M_3 の追従誤差

図 37 オブザーバ未使用時 (予備実験)



(a) モータ回転角



(b) モータ M_2/M_3 の追従誤差

図 38 オブザーバ使用時 (予備実験)

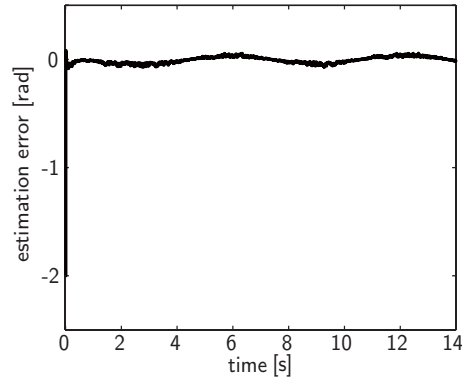


図 39 推定誤差 (予備実験)

3.4 実ネットワークを用いた検証実験

3.4.1 実験方法

本節では、実ネットワークを介した複数プラントの連動実証実験を行う。制御対象は前節と同様の DC モータ M_i , $i = 1, 2, 3$ であり、図 48 に実験装置の構成を示す。モータ M_1, M_2 の制御器には、3.2 節の実験と同じ計算機 a を用いている。また、前節の予備実験と異なり、本実験では M_1 の観測信号 y_1 (モータ回転角) はイーサネットを介して、 M_3 を制御する計算機 b へ送信される。送信の際に、 y_1 のデータ領域内に時刻情報を付加することでタイムスタンプの取得をソフトウェア実装しており、プロトコルに改変を加えていない。なお、タイムスタンプを用いて遅延時間を計測するため、3.2 節で述べた時刻同期を実験前に行っている。

本実験では、計算機 a, b が属するサブネットワーク間を結ぶ中継器を用意し、計算機 a から送られてきた観測信号を b へ転送する。転送の際に、ソフトウェア NIST Net により遅延時間を生成した。切替え型オブザーバは計算機 b 内で実装されており、モータ M_1 の回転角を推定する。最大遅延は 200 ms ($h_d = 20$) であり、その他の条件は前節の実験と同じである。

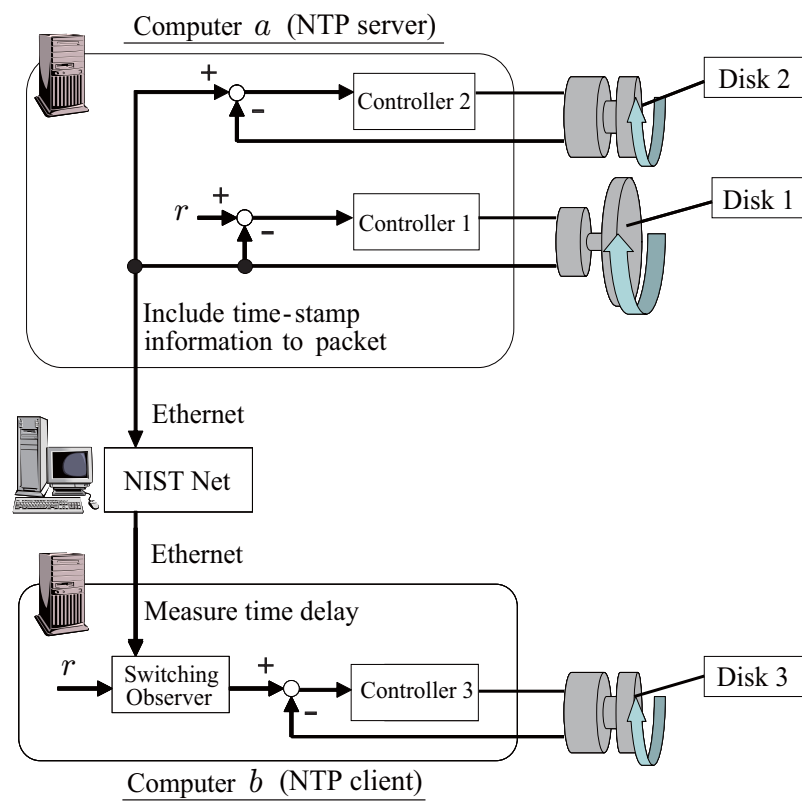
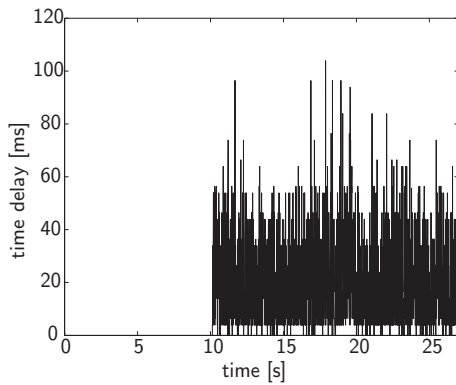


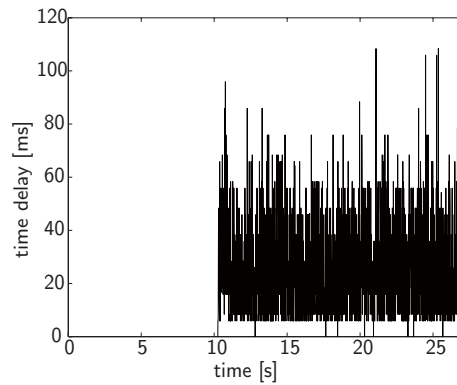
図 40 実験装置の構成 (実ネットワークによる検証)

3.4.2 シミュレーション結果

遅延の影響を確認するために切替え型オブザーバ使用／未使用の場合で比較した。NIST Net により生成された遅延時間を図 41 に示す。各場合で遅延の推移が異なるが、これは遅延時間を変率的に変化させる NIST Net の仕様によるものである。



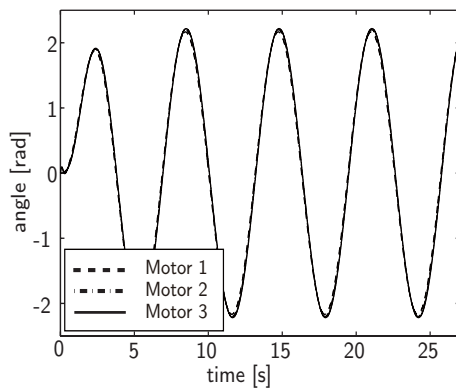
(a) オブザーバ使用時



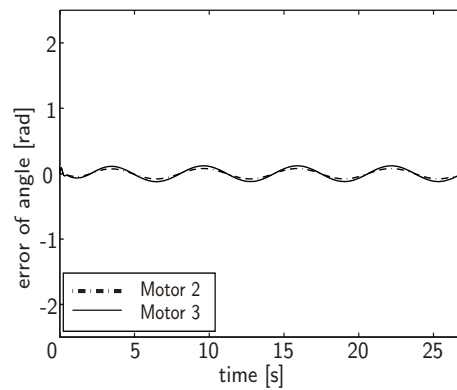
(b) オブザーバ未使用時

図 41 遅延時間の推移 (実ネットワークによる検証)

オブザーバ使用時の結果を図 42 に示す. 同図 (a), (b) はそれぞれモータ回転角およびモータ M_1 の回転角に対する M_2 , M_3 の追従誤差である. 約 10 秒後に不規則な遅延が発生するが, モータ M_3 は M_1 に追従していることが確認できる. そのときの推定誤差を図 43 を示す. 同図より, 推定誤差が零に収束していることがわかる.



(a) モータ回転角



(b) モータ M_2/M_3 の追従誤差

図 42 オブザーバ使用時 (シミュレーション)

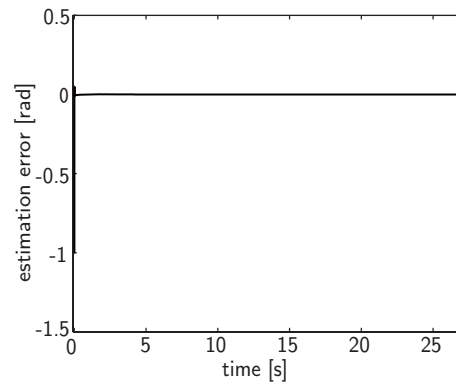
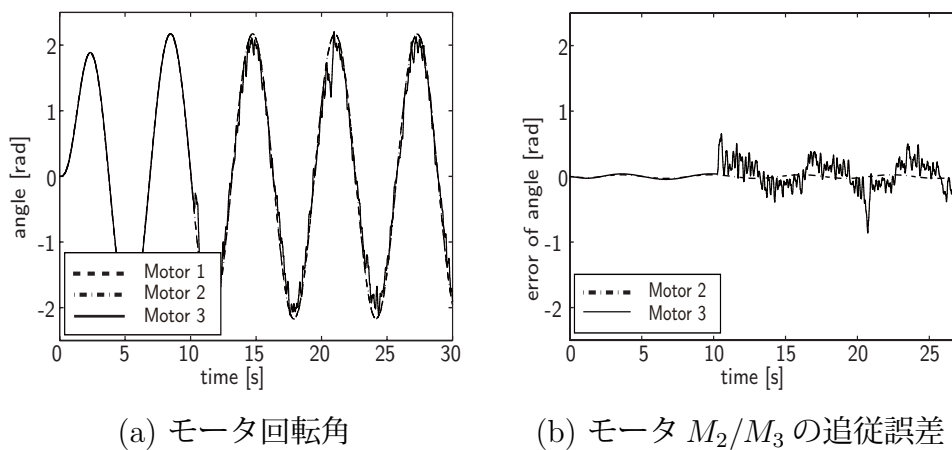


図 43 推定誤差 (シミュレーション)

一方，図 44 はオブザーバを用いないときの結果であり，遅延の影響でモータ M_3 の追従特性が悪化していることが確認できる。



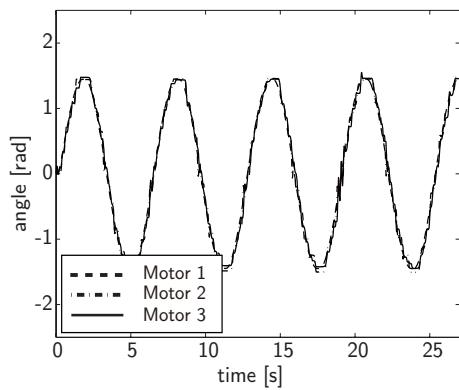
(a) モータ回転角

(b) モータ M_2/M_3 の追従誤差

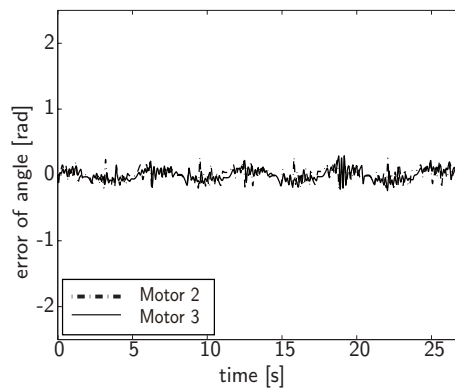
図 44 オブザーバ未使用時 (シミュレーション)

3.4.3 実験結果

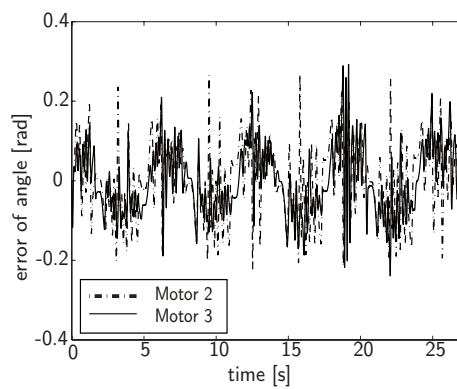
図 45, 46 に切替え型オブザーバを用いた場合の結果を示す。推定誤差が若干残るものの，オブザーバ未使用の場合 (図 47) と比較して M_3 の追従特性は十分に改善されていることがわかる。



(a) モータ回転角



(b) モータ M_2/M_3 の追従誤差



(c) モータ M_2/M_3 の追従誤差
(拡大図)

図 45 オブザーバ使用時 (実ネットワークによる検証)

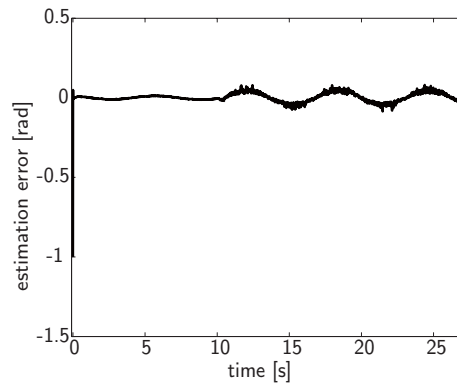
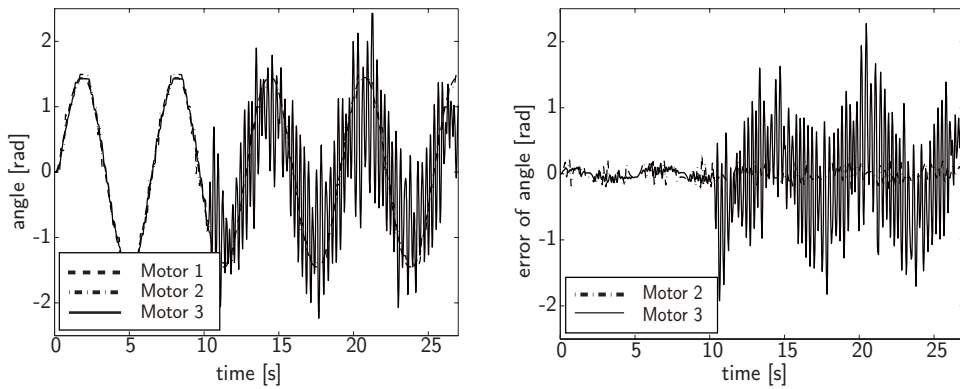


図 46 推定誤差 (実ネットワークによる検証)



(a) モータ回転角

(b) モータ M_2/M_3 の追従誤差

図 47 オブザーバ未使用時 (実ネットワークによる検証)

3.5 高負荷なネットワーク環境下での検証

3.5.1 実験方法

ネットワークに負荷が与えられた場合での検証実験をおこなう．図 48 に実験装置の構成を示す．前節と同様に，モータ M_i , $i = 1, 2, 3$ を制御する二台の計算機を用意し，計算機 a から M_1 の観測信号が送信される．本実験では，両計算機が属するサブネットワーク間を中継器 (Hub) で結び，計算機 a から送られてきた観測信号を b へ伝送する．サブネットワーク内には，ファイルサーバが設置されており，実験時に回線を共有してファイルが転送される．これにより高負荷を

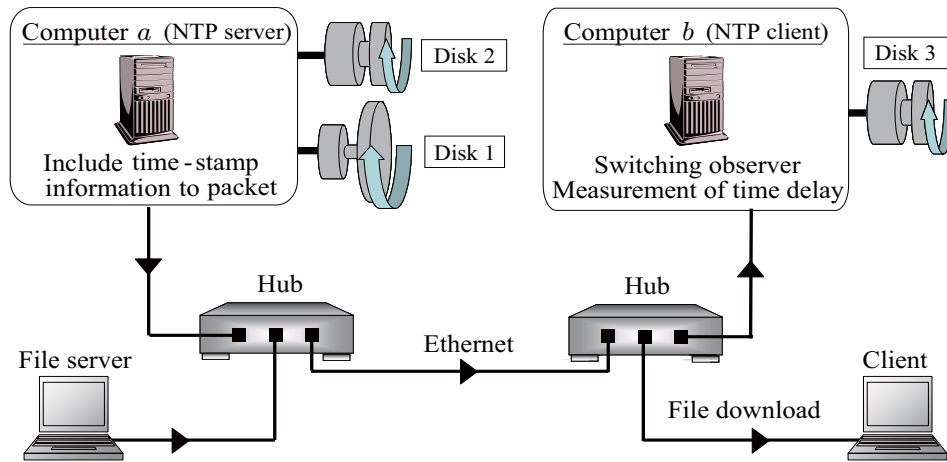
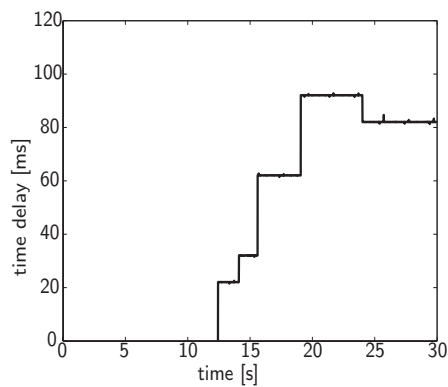
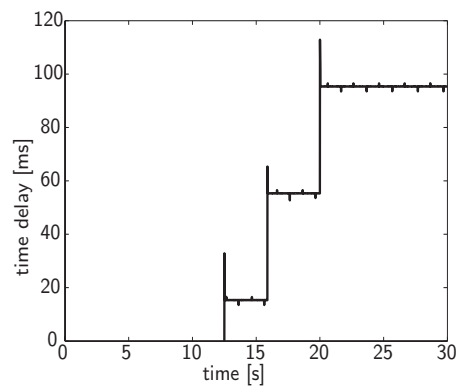


図 48 実験装置の構成 (高負荷な環境下での検証)

伴うネットワーク環境を再現した。図 49 は M_1 の観測信号の伝送遅延時間を表しており、実験開始から約 12 秒後にファイル転送が行われ、その影響で遅延が変動していることが分かる。その他の条件は、前節の実験と同じである。



(a) オブザーバ使用時



(b) オブザーバ未使用時

図 49 遅延時間の推移 (高負荷な環境下での検証)

3.5.2 実験結果

切替え型オブザーバを用いない場合のモータ回転角と追従誤差を図 50 に示す。ファイル転送が行われた期間では、モータ M_3 の回転角が振動的となり、連動していないことが分かる。その一方で、オブザーバを使用すると、前節の結果と同様に良好な追従特性が得られる (図 51, 52)。したがって、切替え型オブザーバにより遅延の影響が補償され、連動が実現される。

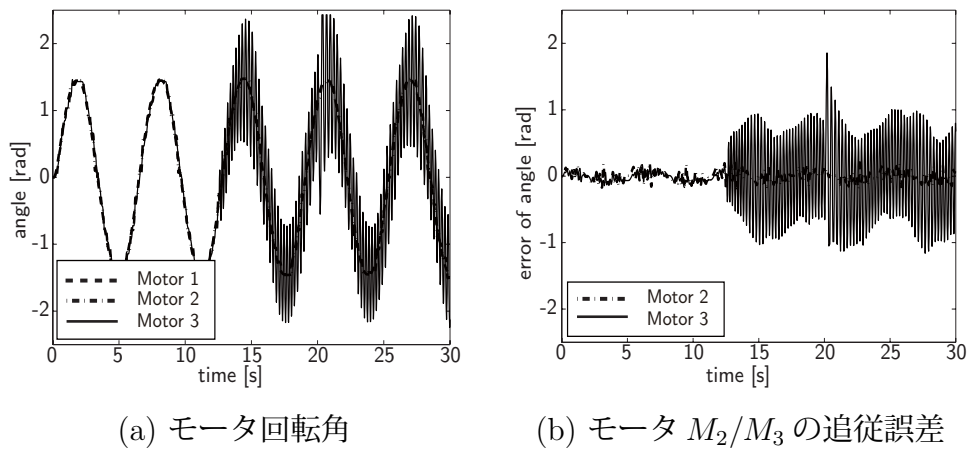


図 50 オブザーバ未使用時 (高負荷な環境下での検証)

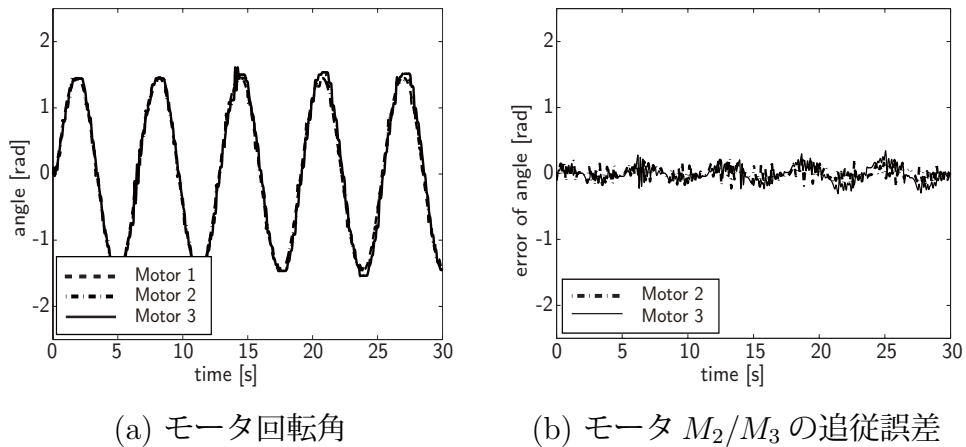


図 51 オブザーバ使用時 (高負荷な環境下での検証)

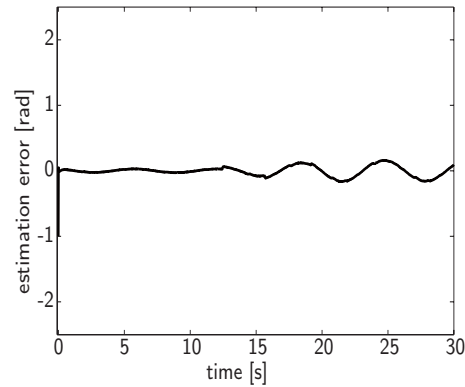


図 52 推定誤差 (高負荷な環境下での検証)

3.6 本章のまとめ

本章では，切替え型オブザーバを用いることで複数機器の連動が達成されることを実ネットワーク上での検証により確認した．本手法により，各制御系では遅延を考慮しない従来の PI 補償器等を用いて連動を実現することができる．また，タイムスタンプによる遅延計測で要求される計算機時刻の同期方法について検討した．

4. おわりに

本論文では、タイムスタンプを用いた不規則遅延の補償方法を提案した。また、提案手法を複数機器の連動に応用し、実ネットワークによる検証を行った。

第2章では、タイムスタンプによる遅延計測を活用したゲイン切替え型オブザーバを提案した。時変の遅延を有するNCSは、Delay bufferの取り出しタップ位置が遅延時間に応じて変化するため、切替え系としてモデル化される。さらに、タイムスタンプを利用することで、あるタイミングでの取り出しタップ位置が既知、すなわち、どのサブシステムに切替わるかを知ることができる。このことを踏まえ、本オブザーバは遅延時間ごとにゲインを用意する切替え型として設計した。切替え型とすることで、単一ゲイン型に比べて推定の過渡特性を改善される。設計に際して、推定誤差系は切替えを伴うため、その安定性が保証されるようなゲインを求めた。さらに、Lyapunov関数の減衰率を考慮した設計法も述べた。この手法により、推定誤差の収束性が改善されることを数値例により示した。

また、倒立振子系から採取したデータに仮想的に遅延を付加した条件下で、オフライン推定実験を行った。ただし、実際のネットワークに本手法を適用するためには、タイムスタンプによる遅延計測の関係上、送受信側の計算機時刻を同期させる必要があり、さらなる検討が必要となった。

そこで第3章では、まず切替え型オブザーバが実ネットワーク上で有効に機能するための実装方法を述べた。計算機時刻は、水晶振動子の個体差が原因で時間とともに同期誤差は増加する。この現象はクロックスキューと呼ばれ、その影響を抑えるために、本研究ではNTPなど種々のキャリブレーションを行い、計算機時刻を必要な精度内で一致させられることを実証した。

つぎに、切替え型オブザーバの応用例として、通信路を介した複数機器の加工作業を取り挙げ、ワークと機器間の連動方法について述べた。オブザーバによる得ワークの推定量を、工作機器への参照値として与えることで、各制御系では遅延を考慮した制御器を別途用意せずに連動することができる。最後に、実際のネットワーク上で検証実験をおこない、切替え型オブザーバにより不規則遅延が補償されることを示した。

謝辞

本論文の審査をして頂きました奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 応用システム科学講座 杉本謙二教授，システム制御・管理講座 西谷紘一教授，応用システム科学講座 平田健太郎准教授に厚く御礼申し上げます。

杉本教授には，切替え型オブザーバの概念を御提示して頂き，著者がネットワーク化制御系の研究に取り組むきっかけとなりました。深く感謝致します。また，西谷教授には，産業界におけるフィールドバスの現状等について御指摘を賜り，今後 NCS の研究を進める際の指針になると感じました。改めて御礼申し上げます。平田健太郎准教授からは，有益な御助言，御討議を賜りました。さらに，研究に対する心構えや研究の進め方など多くのことを学ぶことができ，平田准教授の御指導がなければ，本研究を成し遂げられなかったと思います。心より感謝致します。

切替え型オブザーバの設計方法や実験環境の構築に関して御助言を賜りました小木曾公尚助教，ネットワーク通信技術の観点から御意見を賜りました橘拓至助教に厚く御礼申し上げます。また，京都大学 笠原正治准教授 (応用システム科学講座 元助教)，岩手大学 佐藤淳准教授 (同講座 元助手)，関西大学 安達直世助教 (同講座 元助手) には，著者が博士前期課程在籍時に定例研究会等で御助言を承りました。深く感謝致します。また，研究・学生生活に関わる事務手続きなどを代行して頂きました秘書の橋本洋子様にも厚く御礼申し上げます。

応用システム科学講座の先生方，橋本様，学生の皆様には，様々な場面で気を遣って頂き，また励ましの言葉を受け賜りました。御礼申し上げます。

最後に，常に心の支えとなった家族，友人に心より感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Z. Sun and S. S. Ge: *Switched Linear Systems Control and Design*, Springer-Verlag (2005)
- [2] H. K. Khalil: *Nonlinear Systems*, 3rd edition, Prentice Hall (2002)
- [3] S. Mu, T. Chu, and L. Wang: Impulsive control of networked systems with communication delays; in *Proc. 2005 American Control Conference (2005 ACC)*, pp. 4980-4985 (2005)
- [4] S. B. Moon, P. Skelly, and D. Towsley: Estimation and removal of clock skew from network delay measurements; in *Proc. IEEE INFOCOM'99 Conference on Computer Communications*, pp. 227-234 (1999)
- [5] A. Alessandri and P. Coletta: Design of Luenberger observers for a class of hybrid linear systems, *Hybrid Systems: Computation and Control*, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 2034, pp. 7-18, Springer-Verlag (2001)
- [6] W. L. D. Koning: Digital optimal reduced-order control of pulse-width-modulated switched linear systems; *Automatica*, vol. 39, no. 11, pp. 1997-2003 (2003)
- [7] 鍋倉正和, 橋谷道明, 西村幸久, 薄出淳二: 低騒音歯車加工を目指した同期ギアシェービング盤; 三菱重工技報, vol. 39, no. 4, pp. 212-215 (2002)
- [8] W. Zhang, M. S. Branicky, and S. M. Phillips: Stability of networked control systems; *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21, no. 1, pp. 84-99 (2001)
- [9] 汐月哲夫: インターネットの遅延特性と双方向遠隔通信制御; システム/制御/情報, vol. 45, no. 12, pp. 695-702 (2002)

- [10] B. Stanczyk, S. Hirche, and M. Buss: Telemanipulation over the Internet: a tele-assembly experiment; in *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics and Robotics (MechRob2004)*, pp. 315-320 (2004)
- [11] 中村幸紀, 平田健太郎, 杉本謙二: タイムスタンプを用いた切替え型オブザーバによるネットワーク上の複数機器の連動; システム制御情報学会論文誌, vol. 21, no. 7, pp. 211-218 (2008)
- [12] O. Gurewitz, I. Cidon, and M. Sidi: Network classless time protocol based on clock offset optimization; *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 14, no. 4, pp. 876-888 (2006)
- [13] D. Veitch, S. Babu, and A. Pásztor: Measurement tools: Robust synchronization of software clocks across the internet; in *Proc. 4th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement (IMC'04)*, pp. 219-232 (2004)
- [14] K. Kogiso and K. Hirata: A reference governor in a piecewise state affine function; in *Proc. 42nd IEEE Conference on Decision & Control (CDC'03)*, pp. 1747-1752 (2003)
- [15] A. Pásztor and D. Veitch: PC based precision timing without GPS; in *Proc. 2002 ACM SIGMETRICS international conference on Measurement and modeling of computer systems*, pp. 1-10 (2002)
- [16] D. P. Bovet and M. Cesati (高橋浩和, 杉田由美子, 高杉昌督, 畑崎恵介, 平松雅巳, 安井隆宏 訳): 詳解 Linux カーネル 第二版; オーム社 (2003)
- [17] J. Micheel, S. Donnelly, and I. Graham: Dealing with high speed links and other measurement challenges: Precision timestamping of network packets; in *Proc. 1st ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement (IMW'01)*, pp. 273-277 (2001)
- [18] A. Pásztor and D. Veitch: A precision infrastructure for active probing; in

- Proc. PAM2001, Workshop and Passive and Active Measurements*, pp. 33-44 (2001)
- [19] 北口善明, 町澤朗彦, 箱崎勝也, 中川晋一: 高精度時刻 PC による片道遅延時間によるネットワーク帯域推定手法; 電子情報通信学会論文誌, vol.J87-B, no. 10, pp. 1696-1703 (2004)
- [20] D. L. Mills: Adaptive hybrid clock discipline algorithm for the Network Time Protocol; *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, no. 5, pp. 505-514 (1998)
- [21] D. L. Mills: Improved algorithms for synchronizing computer network clocks; *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 3, no. 3, pp. 245-254 (1995)
- [22] D. L. Mills: Network Time Protocol (Version 3) specification, implementation and analysis; Network Working Group Report RFC-1305, University of Delaware (1992)
- [23] NICT(情報通信研究機構) NTP 公開サービス
<http://www2.nict.go.jp/w/w114/stsi/PubNtp/>
- [24] Y. Kitaguchi, A. Machizawa, M. Tsuru, H. Fukuoka, and K. Hakoziaki: Research of advanced time synchronous system with network support; in *Proc. 2003 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM'03)*, pp. 1036-1039 (2003)
- [25] NIST Net web site
<http://www-x.antd.nist.gov/nistnet/>
- [26] R. Luck and A. Ray: An observer-based compensator for distributed delays; *Automatica*, vol. 26, no. 5, pp. 903-908 (1990)

- [27] D. K. Kim, P. Park, and J. W. Ko: Output-feedback \mathcal{H}_∞ control of systems over communication networks using a deterministic switching systems approach; *Automatica*, vol. 40, no. 7, pp. 1205-1212 (2004)
- [28] D. Liberzon: *Switching in Systems and Control*, Birkhäuser (2003)
- [29] D. Liberzon and A. S. Morse: Basic problems in stability and design of switched systems; *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 19, no. 5, pp. 59-70 (1999)
- [30] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Glover: *Robust and Optimal Control*, Prentice Hall (1996)
- [31] 劉康志：線形ロバスト制御，コロナ社 (2002)
- [32] 木村英紀： H_∞ 制御，コロナ社 (2000)
- [33] S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan: *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*, SIAM (1994)
- [34] 岩崎徹也：LMI と制御，昭晃堂 (1997)
- [35] J. Marescaux, J. Leroy, M. Gagner, F. Rubino, D. Mutter, M. Vix, S. E. Butner, and M. K. Smith: Transatlantic robot-assisted telesurgery; *Nature*, vol. 413, no. 6854, pp. 379-380 (2001)
- [36] Intuitive Surgical 社製 da Vinci
<http://www.intuitivesurgical.com/>
- [37] J. Daafouz, P. Riedinger, and C. Iung: Stability analysis and control synthesis for switched systems: a switched Lyapunov function approach; *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, no. 11, pp. 1883-1887 (2002)
- [38] D. Mignone, G. Ferrari-Trecate, and M. Morari: Stability and stabilization of piecewise affine and hybrid systems: an LMI approach; in *Proc. 39th IEEE Conference on Decision and Control (39th CDC)*, pp. 504-509 (2000)

- [39] A. Hassibi and S. Boyd: Quadratic stabilization and control of piecewise-linear systems; in *Proc. American Control Conference (ACC'98)*, pp. 3659-3664 (1998)
- [40] F. A. Cuzzola and M. Morari: A generalized approach for analysis and control of discrete-time piecewise affine and hybrid systems; *Hybrid Systems: Computation and Control*, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 2034, pp. 347-360, Springer-Verlag (2001)
- [41] C. W. Wu: *Synchronization in Coupled Chaotic Circuits and Systems*, World Scientific (2002)
- [42] F. L. Lian, J. R. Moyne, and D. M. Tibury: Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21, no. 1, pp. 66-83 (2001)
- [43] 野波健蔵, 田宏奇: スライディングモード制御 —非線形ロバスト制御の設計理論—, コロナ社 (1994)
- [44] Y. Nesterov and A. Nemirovskii: *Interior-Point Polynomial Algorithms in Convex Programming*, SIAM (1994)
- [45] M. Felser: Real-Time Ethernet –Industry Prospective; *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 6, pp. 1118-1128 (2005)
- [46] P. Neumann: Communication in industrial automation –What is going on?; *Control Engineering Practice*, vol. 15, no. 11, pp. 1332-1347 (2007)
- [47] 特集 計測制御ネットワークの標準化; 計測と制御, vol. 44, no. 6 (2005)
- [48] International Electrotechnical Commission (IEC):
<http://www.iec.ch/>
- [49] Fieldbus Foundation:
<http://www.fieldbus.org/>

- [50] PROFIBUS & PROFINET International:
<http://www.profibus.jp/>
- [51] Open DeviceNet Vendor Association (ODVA):
<http://www.odva.org/>
- [52] CC-Link Partner Association (CLPA):
<http://www.cc-link.org/>
- [53] INTERBUS Club:
<http://www.interbusclub.com/>
- [54] TCnet: IEC 61784-5-11 (2007)
- [55] Vnet/IP: IEC 61784-5-10 (2007)
- [56] M. S. Branicky, S. M. Phillips, and W. Zhang: Stability of networked control systems: explicit analysis of delay; in *Proc. American Control Conference (ACC2000)*, pp. 4980-4985 (2006)
- [57] L. A. Montestruque and P. J. Antsaklis: On the model-based control of networked systems; *Automatica*, vol. 39, no. 10, pp. 1837-1843 (2003)
- [58] S. Mu, T. Chu, and L. Wang: Impulsive control of networked systems with communication delays; in *Proc. American Control Conference (ACC2005)*, pp. 650-655 (2005)
- [59] R. J. Anderson and M. W. Spong: Bilateral control of teleoperation with time delay; *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 34, no. 5, pp. 494-501 (1989)
- [60] B. Brogliato, R. Lozano, B. Maschke, and O. Egeland: *Dissipative Systems Analysis and Control: Theory and Applications*, Springer-Verlag (2007)

- [61] G. M. H. Leung, B. A. Francis, and J. Apkarian: Bilateral controller for teleoperators with time delay via μ -synthesis; *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 1, pp. 105-116 (1995)
- [62] D. Yue, Q.-L. Han, and C. Peng: State feedback controller design for networked control systems; *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 51, no. 11, pp. 640-644 (2004)
- [63] G. Niemeyer and J.-J. E. Slotine: Towards force-reflecting teleoperation over the Internet; in *Proc. 1998 IEEE Conference on Robotics & Automation (ICRA '98)*, pp. 1909-1915 (1998)
- [64] X. Jiang, Q. L. Han, S. Liu, and A. Xue: A new H_∞ stabilization criterion for networked control systems; *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, no. 4, pp. 1025-1032 (2008)
- [65] P. Naghshtabrizi and J. Hespanha: Designing observer-type controllers for network control systems; in *Proc. 44th IEEE Conference on Decision & Control (44th CDC)*, pp. 2876-2880 (2005)
- [66] D. Yue, Q.-L. Hanb, and J. Lamc: Network-based robust H_∞ control of systems with uncertainty; *Automatica*, vol. 41, no. 6, pp. 999-1007 (2005)
- [67] H. Gao, T. Chen, and J. Lam: A new delay system approach to networked-based control; *Automatica*, vol. 44, no. 1, pp. 39-52 (2008)
- [68] K. Gu, V. L. Kharitonov, K. Gu, and J. Chen: *Stability of Time-Delay Systems*, Birkhäuser (2003)
- [69] J. Nilsson and B. Bernhardsson: LQG control over a Markov communication network; in *Proc. 36th IEEE Conference on Decision and Control (36th CDC)*, pp. 4586-4591 (1997)

- [70] L. Zhang, Y. Shi, T. Chen, and B. Huang: A new method for stabilization of networked control systems with random delays; *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 50, no. 8, pp. 1177-1181 (2005)
- [71] L. Xiao, A. Hassibi, and J. P. How: Control with random communication delays via a discrete-time jump linear system approach; in *Proc. American Control Conference (ACC2000)*, pp. 2199-2204 (2000)
- [72] H. Shousong and Z. Qixin: Stochastic optimal control and analysis of stability of networked control systems with long delay; *Automatica*, vol. 39, no. 11, pp. 1877-1884 (2003)
- [73] J. Nilsson: Real-time control systems with delays; Ph.D. dissertation, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (1998)
- [74] 森村英典, 高橋幸雄: マルコフ解析, 日科技連出版社 (1979)
- [75] K. S. Narendra and J. Balakrishnan: A common Lyapunov function for stable LTI systems with commuting A-matrices; *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39, no. 24, pp. 2469-2471 (1994)
- [76] A. A. Agrachev and D. Liberzon: Lie-algebraic stability criteria for switched systems; *SIAM Journal of Control and Optimization*, vol. 40, no. 1, pp. 253-269 (2001)
- [77] A. S. Morse: Supervisory control of families of linear set-point controllers Part I. Exact matching; *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 41, no. 10, pp. 1413-1431 (1996)
- [78] J. P. Hespanha and A. S. Morse: Stability of switched systems with average dwell-time; in *Proc. 38th IEEE Conference on Decision & Control (38th CDC)*, pp. 2655-2660 (1999)

- [79] J. P. Hespanha: Uniform stability of switched linear systems: extensions of Lasalle's invariance principle; *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 4, pp. 470-482 (2004)
- [80] R. A. Decarlo, M. S. Branicky, S. Pettersson, and B. Lennartson: Perspectives and results on the stability and stabilizability of hybrid systems; *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, pp. 1069-1082 (2000)
- [81] 文部科学省 研究開発局, 防災科学技術研究所, 国際レスキューシステム研究機構: 大都市大災害軽減化特別プロジェクト III 被害者救助等の災害対応戦略の最適化 4. レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発 H18 年度成果報告書 (2007)
- [82] R. W. Beard and T. W. McLain: Multiple UAV cooperative search under collision avoidance and limited range communication constraints; in *Proc. 42nd IEEE Conference on Decision & Control (42nd CDC)* , pp. 25-30 (2003)
- [83] P. Seiler and R. Sengupta: Analysis of communication losses in vehicle control problems; in *Proc. American Control Conference (ACC2001)*, pp. 1491-1496 (2001)
- [84] 野波健蔵: 民生用自律無人航空機 UAV・MAV の研究開発の現状と展望; 日本機械学会論文集 C 編; vol. 72, no. 721, pp. 2697-2705 (2006)
- [85] H. Ishii: Stabilization under shared communication with message losses and its limitations; in *Proc. 45th IEEE Conference on Decision & Control (45th CDC)* , pp. 4974 - 4979 (2006)
- [86] 新銀秀徳, 太田快人: 通信容量の制約をともしう外乱抑制; 計測自動制御学会論文集, vol. 43, no. 9, pp. 806-811 (2007)
- [87] Special issue on networked control systems; *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 9 (2004)

- [88] Special issue on technology of networked control systems; *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 1 (2007)
- [89] 特集 ネットワーク化制御システムの展開;計測と制御, vol. 47, no. 8 (2008)
- [90] R. Olfati-Saber and R. M. Murray: Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays; *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1520-1533 (2004)
- [91] N. Chopra and M. W. Spong: Output synchronization of nonlinear systems with time delay in communication; in *Proc. 45th IEEE Conference on Decision & Control (45th CDC)* , pp. 4986-4992 (2006)
- [92] J. Cortes, S. Martinez, T. Karatas, and F. Bullo: Coverage control for mobile sensing networks; in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2002)*, pp. 1327-1332 (2002)
- [93] P. Peleties and R. DeCarlo: Asymptotic stability of m-switched systems using Lyapunov-like functions; in *Proc. American Control Conference (ACC1991)*, pp. 1679-1684 (1991)
- [94] M. S. Branicky: Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switchedand hybrid systems; *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 43, no. 4, pp. 475-482 (1998)

付録

A. Schur complement (Schur の補題)

補題 1. [33, 34] 実対称行列 X が与えられたとする. このとき, 次の命題は等価である.

1.

$$X := \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X'_{12} & X_{22} \end{bmatrix} > 0$$

2. $X_{11} > 0$ かつ $X_{22} - X'_{12}X_{11}^{-1}X_{12} > 0$

3. $X_{22} > 0$ かつ $X_{11} - X_{12}X_{22}^{-1}X'_{12} > 0$

B. オンラインで参照値を与える場合の連動

ここでは, 参照値 r と観測信号 y_1 がネットワークを介して S_3 へ送信される場合を考える (図 53).

このとき, r と y_1 を例えば一つのデータにまとめて S_3 へ送信することにより, 両信号の伝送遅延 d は等しくなる. オブザーバ設計では, 通常のサーボ系設計でおこなわれているように, r のダイナミクスをステップと仮定した上で, 次式の拡大系を構成する.

$$\begin{aligned} x_{\text{ar}}(k+1) &= A_{\text{ar}}x_{\text{ar}}(k), \\ y_{1r}(k-d(k)) &= C_{\text{ar}}(d(k))x_{\text{ar}}(k), \quad k \in \mathbb{N}, \end{aligned}$$

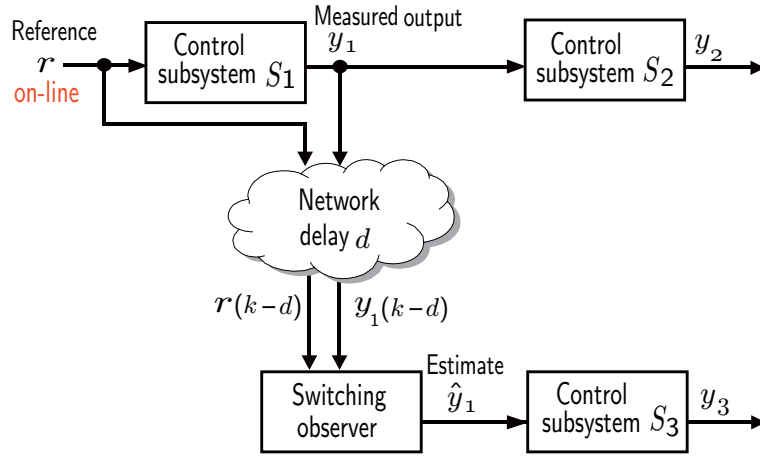


図 53 オンラインの場合の連動システム

$$\begin{aligned}
 x_{\text{ar}} &= \begin{bmatrix} x' & y_1'(k-1) & \cdots & y_1'(k-h_d) & r'(k) & r'(k-1) & \cdots & r'(k-h_d) \end{bmatrix}', \\
 y_{1r} &= \begin{bmatrix} y_1' & r' \end{bmatrix}', \\
 A_{\text{ar}} &= \left[\begin{array}{cc|cc} A & & B & \mathbf{0}_{n \times r_1} \\ & \mathbf{0}_{q_1 \times r_1} & & \\ C & & & \mathbf{0}_{p \times p} \quad \mathbf{0}_{p \times r_1} \\ \hline \mathbf{0}_{q_2 \times n} & [I_{q_2} \quad \mathbf{0}_{q_2 \times p}] & & \mathbf{0}_{q_2 \times (r_1+p)} \\ \mathbf{0}_{p \times n} & \mathbf{0}_{p \times r_1} & & [I_p \quad \mathbf{0}_{p \times r_1}] \\ \hline \mathbf{0}_{r_1 \times n} & \mathbf{0}_{r_1 \times r_1} & & [I_{r_1} \quad \mathbf{0}_{r_1 \times p}] \end{array} \right], \\
 C_{\text{ar}}(d) &= \begin{cases} \left[\begin{array}{cc|cc} C & \mathbf{0}_{p \times r_1} & & \mathbf{0}_{p \times (r_1+p)} \\ & \mathbf{0}_{p \times (n+r_1)} & & [I \quad \mathbf{0}] \\ \hline \mathbf{0}_{p \times r_2} & I_p & \mathbf{0}_{p \times r_3} & \mathbf{0}_{p \times (r_1+p)} \\ \hline & \mathbf{0}_{p \times (n+r_1)} & & \mathbf{0}_{p \times pd} \quad I_p \quad \mathbf{0}_{p \times r_3} \end{array} \right] & \text{if } d = 0 \\ \left[\begin{array}{cc|cc} & & & \\ & & & \\ \hline & & & \\ \hline & & & \end{array} \right] & \text{if } d = 1, 2, \dots, h_d,
 \end{cases} \\
 q_1 &= n + p, \quad q_2 = p(h_d - 1), \\
 r_1 &= ph_d, \quad r_2 = n + pd - p, \quad r_3 = p(h_d - d)
 \end{aligned}$$

この系に対して、次式の切替え型オブザーバを構成し、3.3.2節と同様に LMI を

用いてゲインを設計する.

$$\hat{x}_{\text{ar}}(k+1) = A_{\text{a}}\hat{x}_{\text{ar}}(k) + F_{\text{ar}}(d(k))\{y_{1r}(k-d(k)) - C_{\text{ar}}(d(k))\hat{x}_{\text{ar}}(k)\}, \quad k \in \mathbb{N},$$

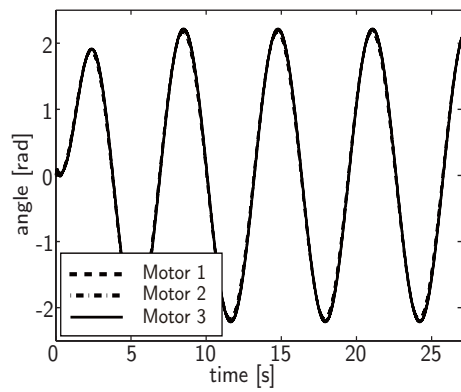
$$\hat{x}_{\text{ar}} := \begin{bmatrix} \hat{x}' & \hat{y}'_1(k-1) & \cdots & \hat{y}'_1(k-h_d) & \hat{r}'(k) & \hat{r}'(k-1) & \cdots & \hat{r}'(k-h_d) \end{bmatrix}'$$

($\hat{\cdot}$) はそれぞれ推定値とする.

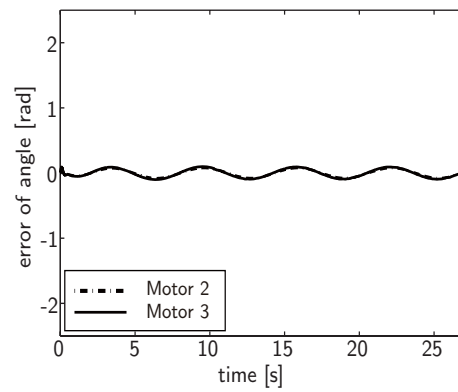
上式のオブザーバを用いたときのシミュレーション結果を図 54 に示す. 伝送遅延は, 図 49(a) に示されたものである. なお, 設計時には, r の動特性をステップ入力と仮定したが, オンラインの場合を想定し, 正弦波 $r(t) = 1.5 \sin(t)$ を S_1 へ与えている⁴.

図 54(a)-(d) はそれぞれモータ回転角, モータ M_1 の回転角に対する M_2/M_3 の追従誤差, 回転角 y_1 の推定誤差, および参照値 r の推定誤差である. 同図より, r をオフラインで与える場合 (図 42) と同様にモータ M_3 が追従がしていることが分かる. 以上より, r がオンラインで与えられる場合についても切替え型オブザーバにより連動が達成される.

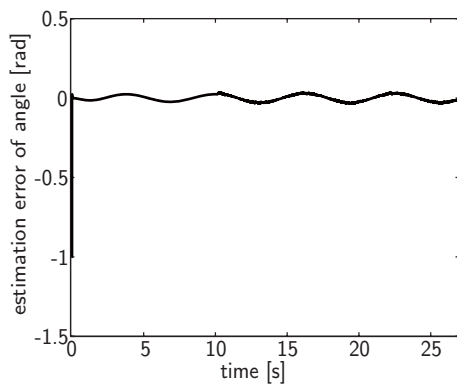
⁴ r の生成モデルがオブザーバ側で既知とすることは, オフラインで r を与えることと大差ないと考えられるため, あえて異なる型の波形を与えている.



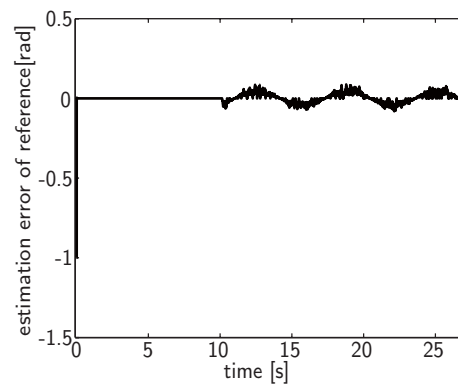
(a) モータ回転角



(b) モータ M_2/M_3 の追従誤差



(c) 回転角 y_1 の推定誤差



(d) 参照値 r の推定誤差

図 54 オンラインの場合

業績一覧

学術論文誌

- 1 中村幸紀, 小木曾公尚, 安達直世, 杉本謙二: 時変の伝送遅延を含む系に対するゲイン切替え型オブザーバ; 計測自動制御学会論文集, vol. 42, no. 11, pp. 1224-1233 (2006)
- 1' Yukinori NAKAMURA, Kiminao KOGISO, Naotoshi ADACHI, and Kenji SUGIMOTO: Gain switching observer for systems with time-varying transmission delay; *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol. E-6, no. 1, pp. 26-35 (2007) (論文1の英訳論文)
- 2 中村幸紀, 平田健太郎, 杉本謙二: タイムスタンプを用いた切替え型オブザーバによるネットワーク上の複数機器の連動; システム制御情報学会論文誌, vol. 21, no. 7, pp. 211-218 (2008)

国際会議 (査読有)

- 1 Yukinori Nakamura, Kiminao Kogiso, and Kenji Sugimoto: Design of a gain switching observer for networked control systems under random delay; in *Proc. 17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS 2006)*, pp. 213-220 (2006)
- 2 Yukinori Nakamura, Kentaro Hirata, Kenji Sugimoto, and Kiminao Kogiso: Cooperative networked control with gain switching observer; in *Proc. IEEE Multi-conference on Systems and Control (16th IEEE International Conference on Control Application and 22nd IEEE International Symposium on Intelligent Control) (MSC 2007 (CCA 2007 & ISIC 2007))*, pp. 184-189 (2007)

- 3 Yukinori Nakamura, Kentaro Hirata, and Kenji Sugimoto: Synchronization of multiple plants over networks via switching observer with time-stamp information; in *Proc. SICE Annual Conference 2008 (SICE 2008)*, pp. 2859-2864 (2008)
- 4 Kensuke Nagai, Yukinori Nakamura, and Kenji Sugimoto: Robust state estimation for systems with irregular sensing failure; to appear in *2009 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2009)* (2009)

国内会議

- 1 中村幸紀, 黒江康明, 森武宏: 対象の滑らかさを考慮したフィードバック誤差学習制御法とその性能評価; 第 48 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'04) 講演論文集, pp. 431-432 (2004)
- 2 中村幸紀, 佐藤淳, 杉本謙二: 数値最適化を用いたハイブリッドオブザーバの設計; 平成 16 年度計測自動制御学会関西支部学生研究発表会 講演論文集, pp. 25-26 (2005)
- 3 中村幸紀, 佐藤淳, 杉本謙二: ネットワーク制御による jitter 補償のためのハイブリッドオブザーバの設計; 第 49 回 システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'05) 講演論文集, pp. 475-476 (2005)
- 4 中村幸紀, 小木曾公尚, 杉本謙二: 伝送遅延時間とその変動を考慮したゲイン切替え型オブザーバの設計; 第 34 回制御理論シンポジウム 資料, pp. 411-414 (2005)
- 5 中村幸紀, 杉本謙二, 小木曾公尚: データ損失と伝送遅延を伴うネットワーク化制御システムに対する状態推定法; 第 49 回自動制御連合講演会, SA6-3-7 (2006)

- 6 中村幸紀, 平田健太郎, 杉本謙二: 複数のモータからなるモデルプラントのネットワーク協調制御 – 切替え型状態推定器の応用 – ; 第7回計測自動制御学会制御部門大会, 83-3-2 (2007)
- 7 中村幸紀, 平田健太郎, 杉本謙二: 実ネットワークを用いた切替え型オブザーバによる複数機器連動の実証実験; 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI 2007) 論文集, pp. 453-454 (2007)
- 8 中村幸紀, 平田健太郎, 杉本謙二: 高負荷なネットワーク環境下における切替え型オブザーバによる複数機器の連動実験; 計測自動制御学会関西支部 平成19年度シンポジウム若手研究発表会 講演論文集, pp. 73-76 (2008)
- 9 長井健祐, 中村幸紀, 杉本謙二: センサ故障にロバストな切替え型状態推定; 第51回自動制御連合講演会, pp. 100-103 (2008)
- 10 中村幸紀, 長井健祐, 杉本謙二: センサ出力のオンライン選択に基づく状態推定 – 非接触センサによる検証実験 – ; 第53回 システム制御情報学会研究発表講演会 (SCT'09) (2009) (発表予定)

受賞

- 1 中村幸紀: 財団法人 奈良先端科学技術大学院大学支援財団, NAIST 最優秀学生賞 (2006)
- 2 中村幸紀: 奈良先端科学技術大学院大学, 最優秀学生賞 (2006)
- 3 Yukinori Nakamura: Society of Instrument and Control Engineers (SICE), Finalist of SICE Annual Conference Young Author's Award (2008)
- 4 Yukinori Nakamura: 計測自動制御学会 産業応用部門, 産業応用部門賞奨励賞 (2008)