



モーションコントロールの高機能化に関する協同研究委員会

無線通信を用いた遠隔地におけるロボット制御

木更津工業高等専門学校
電気電子工学科

浅野洋介

自己紹介

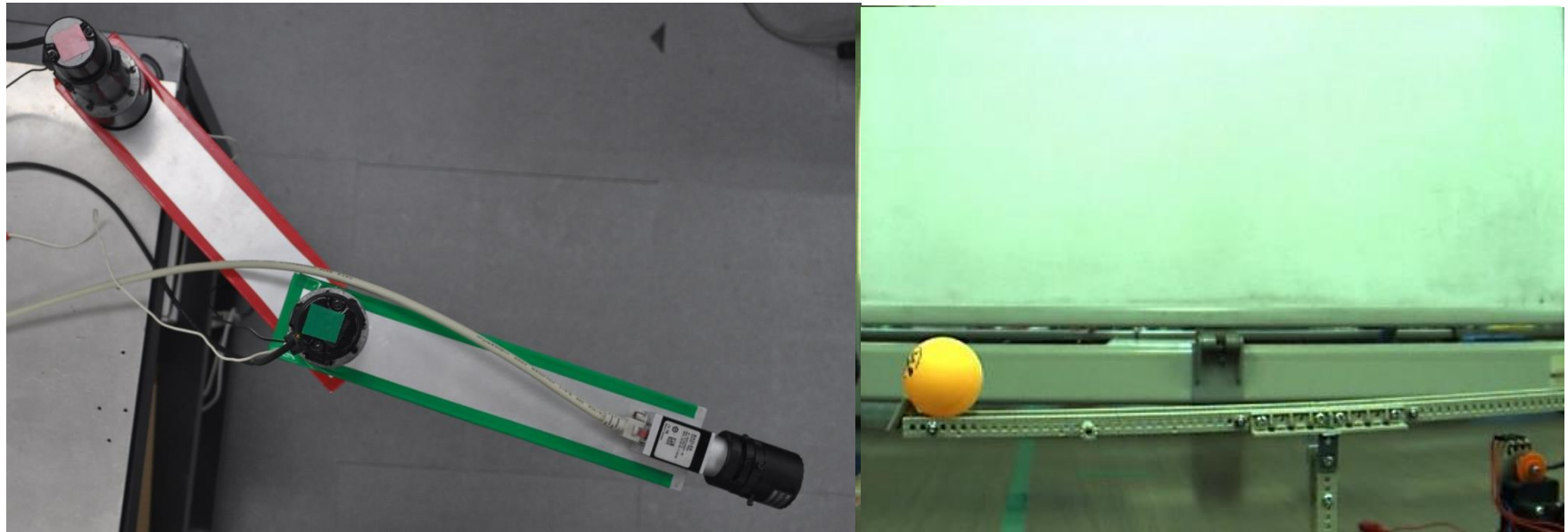
● 略歴

- 2000年 木更津高専 電気電子工学科 卒業
- 2002年 横浜国立大学工学部電子情報工学科卒業(河村研)
- 2004年 横浜国立大学大学院 工学府 物理情報工学専攻博士課程前期修了(藤本康孝研)
- 2004年 木更津高専 電気電子工学科 助手
- 2008年 横浜国立大学大学院 工学府 物理情報工学専攻博士課程後期修了(河村研)
- 2009年9月～2010年1月
 - JICAプロジェクト「トルコ自動制御技術教育普及計画」へ参加
- 現在: 木更津高専 電気電子工学科 准教授

研究室概要

- メンバー: 教員1名, 学生15名
 - 教員 1名
 - 専攻科 2名 (B4, B3相当)
 - 卒研究生 8名 (B2相当)
 - 課題研究生 5名 (B1相当)
- 研究テーマ
 - ロボティクス
 - ビジョン
 - 植物工場

カメラ回転による距離推定

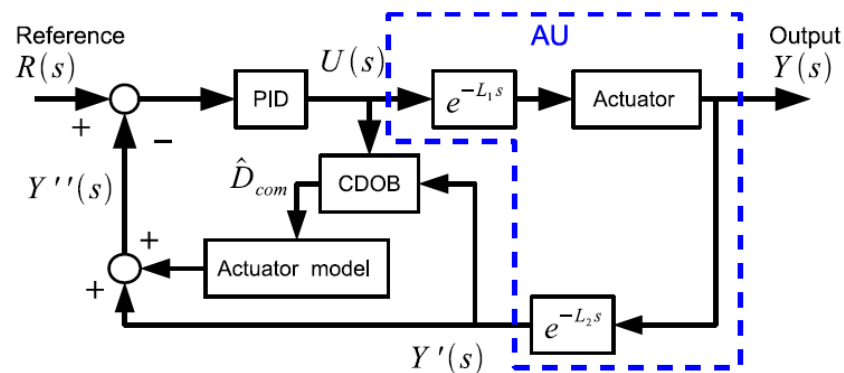
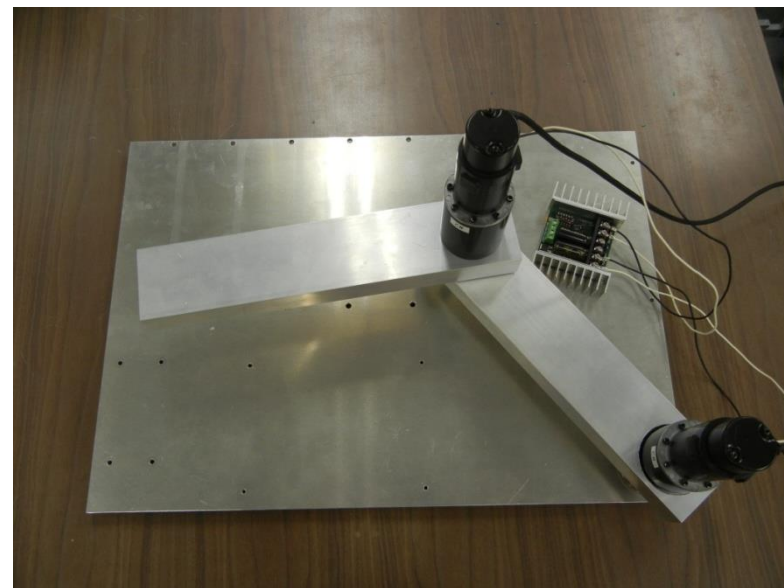
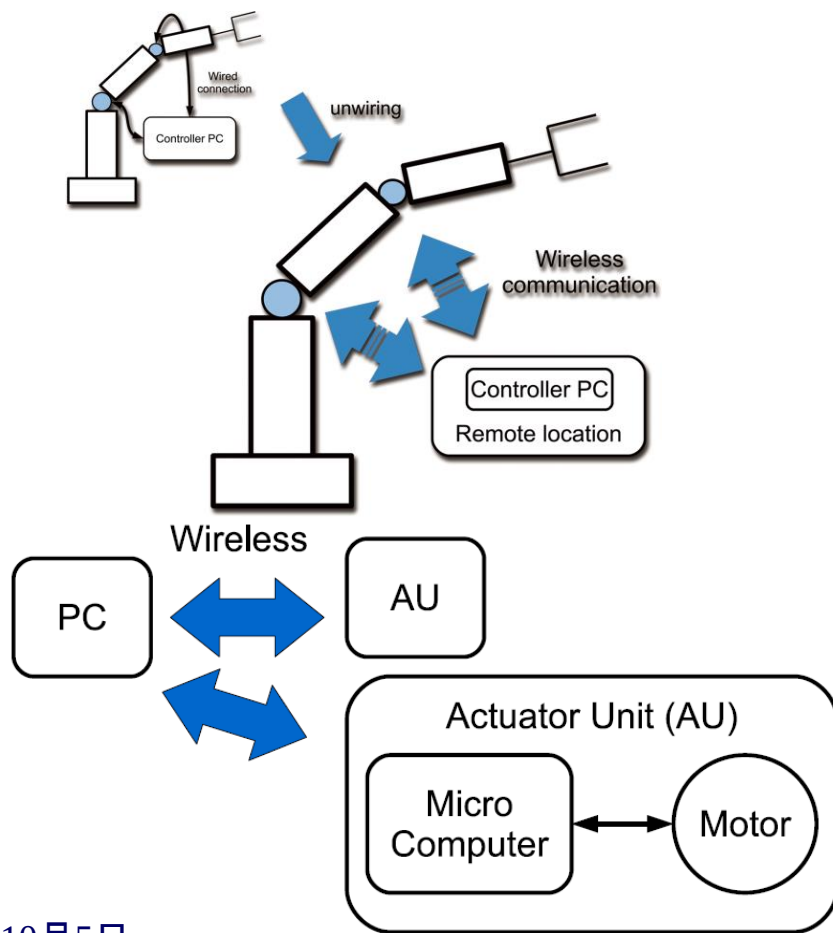


No.	実距離[m]	推定距離[m]	誤差率[%]	焦点距離[mm]
1	0.7	0.709	1.3	7.722
2	1.0	1.073	7.3	7.921
3	1.5	1.699	13.3	7.946
4	2.0	2.146	7.31	7.685

おおむね良好な推定精度

無線通信ロボットの開発・検証

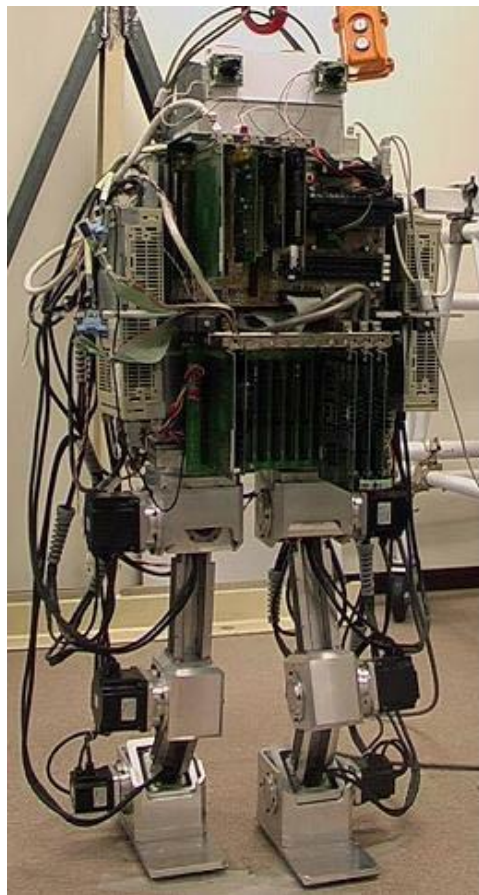
- 省配線の無線制通信ロボット
- CDOB&適応制御を用いたロバスト制御



無線通信を用いた遠隔地における ロボット制御

研究背景

- ロボットのアクチュエータは基本的に**有線接続**



配線を十分に考慮する必要がある

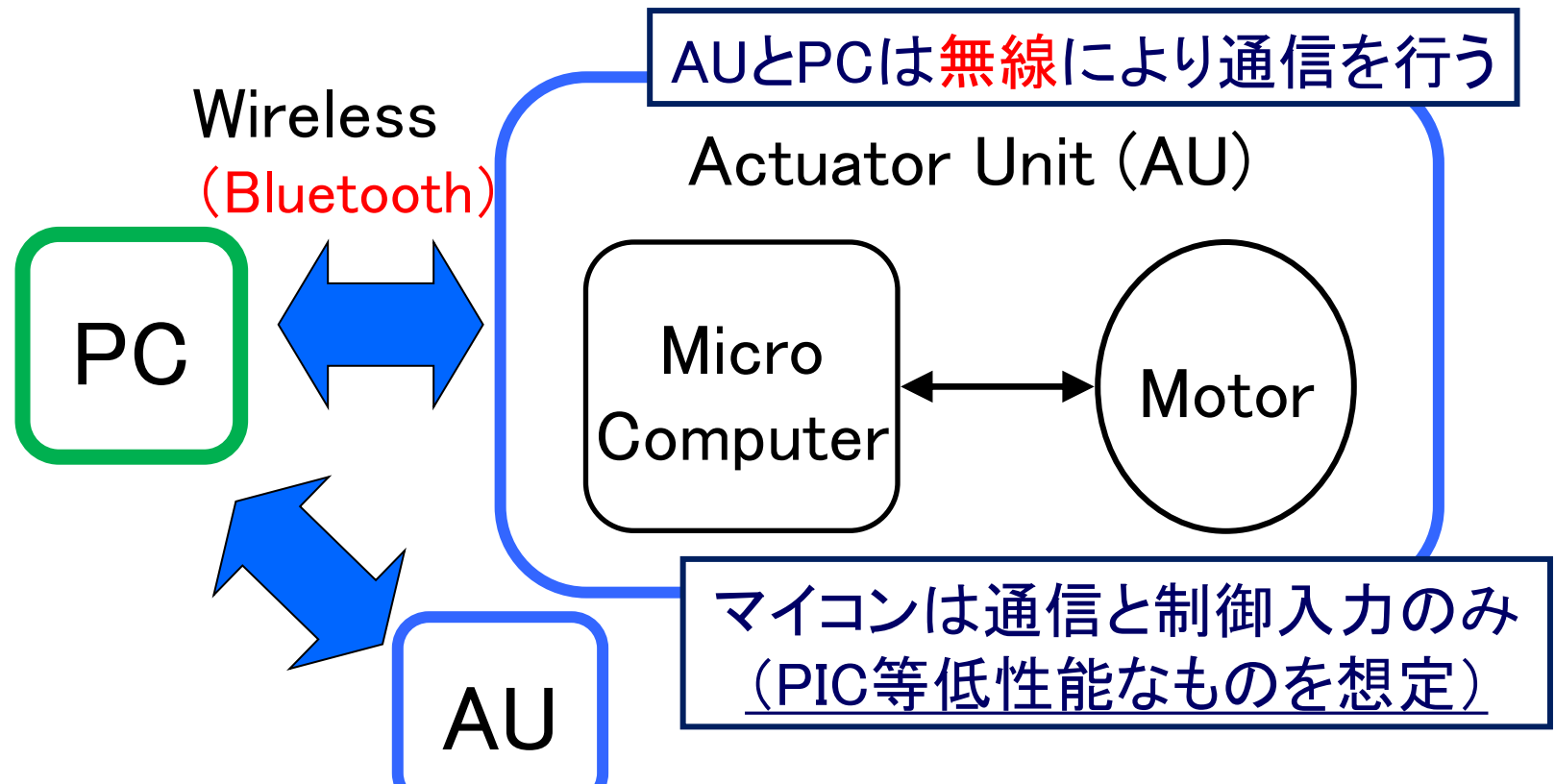
本研究では

無線通信による制御システムを提案

配線の考慮なしにアクチュエータ搭載可能
無線通信時に遅延(むだ時間)が発生

提案システム

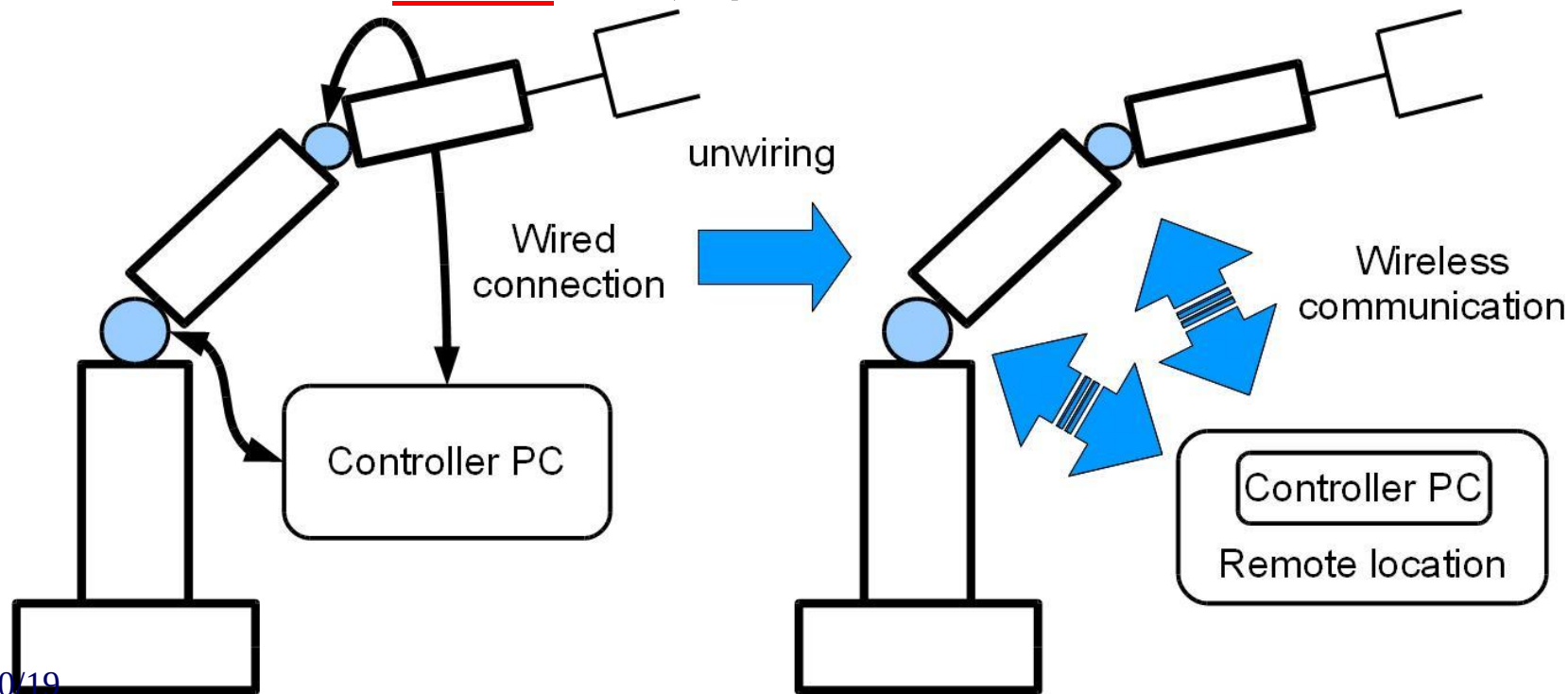
- アクチュエータとマイコン・ドライバ・センサ等をユニットとして構成（アクチュエータユニットと呼称）



約40~70[ms]の遅延が発生

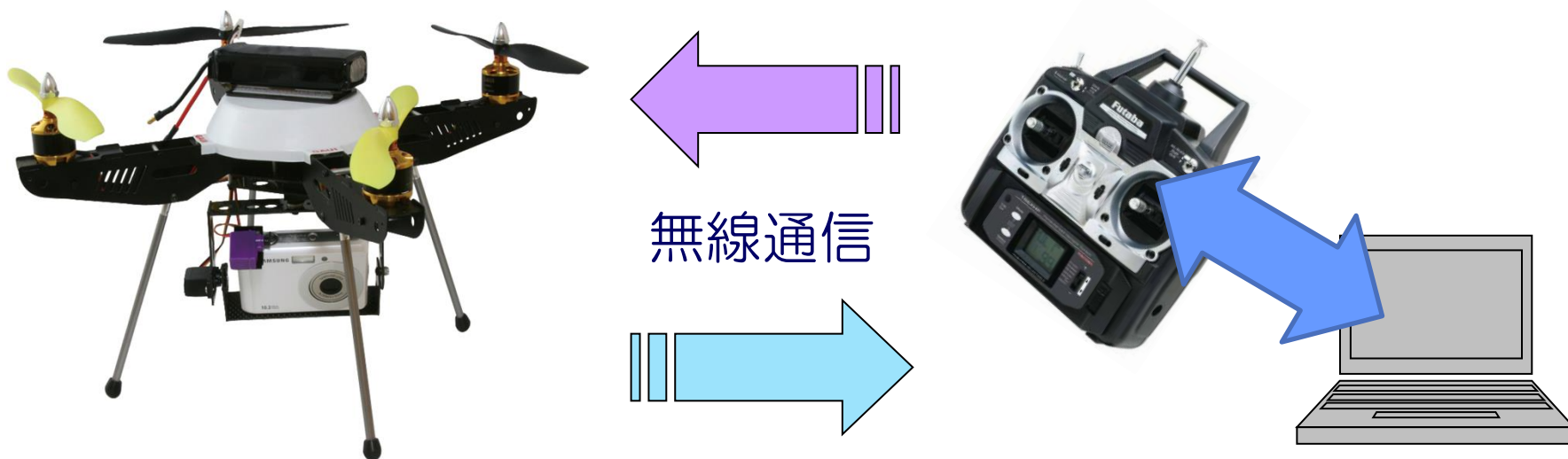
提案システムによるメリット

- 制御器, アクチュエータ間の無線化
関節ごとの配線のみでアクチュエータの搭載可能
- 大型で高性能な制御器を遠隔地に設置
処理能力の向上が期待できる



提案システムによるメリット

- 空中移動ロボットの無線制御も可能



むだ時間制御の関連研究

- Smith法
 - むだ時間モデルを用いてむだ時間の影響を相殺
 - モデルが必要
- 通信外乱オブザーバ(CDOB)^[1]
 - 通信遅れを外乱とし, オブザーバにより推定・補償
 - モデル不要
 - 時変むだ時間系では, 1形システムにおいて定常偏差が発生
 - 実外乱抑圧が困難

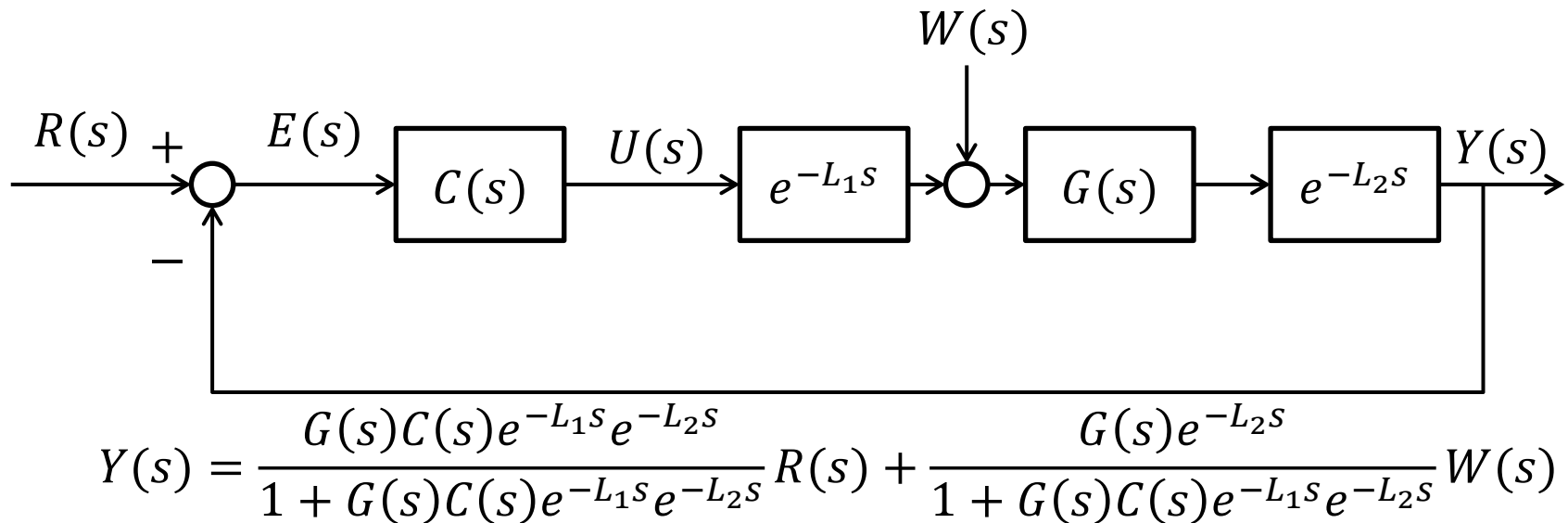
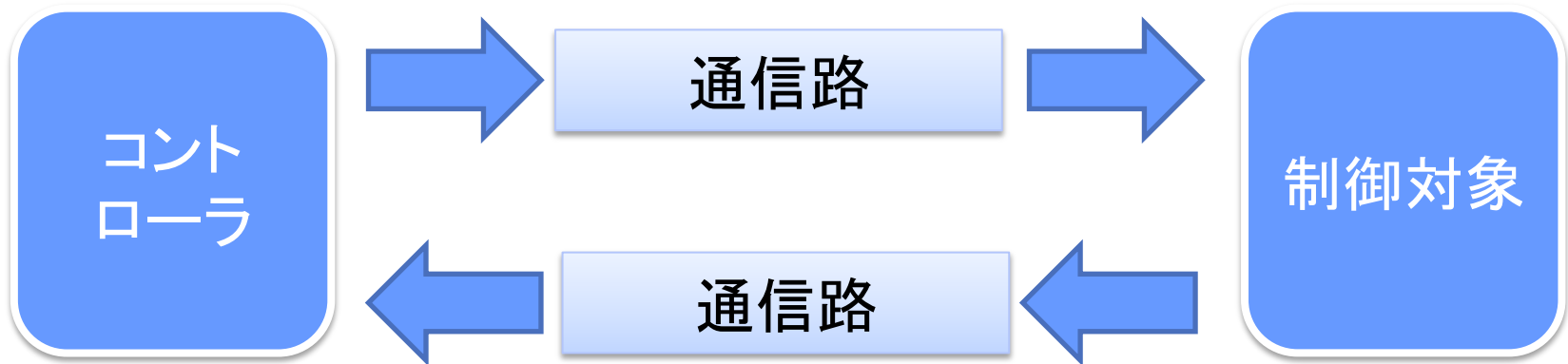
1. 名取賢二, Roberto Oboe, 大西公平: "通信外乱オブザーバを用いた
むだ時間制御系のモデル誤差に対するロバスト性", IEEJ Trans. IA, Vol.128, No.6, 2008

研究目的

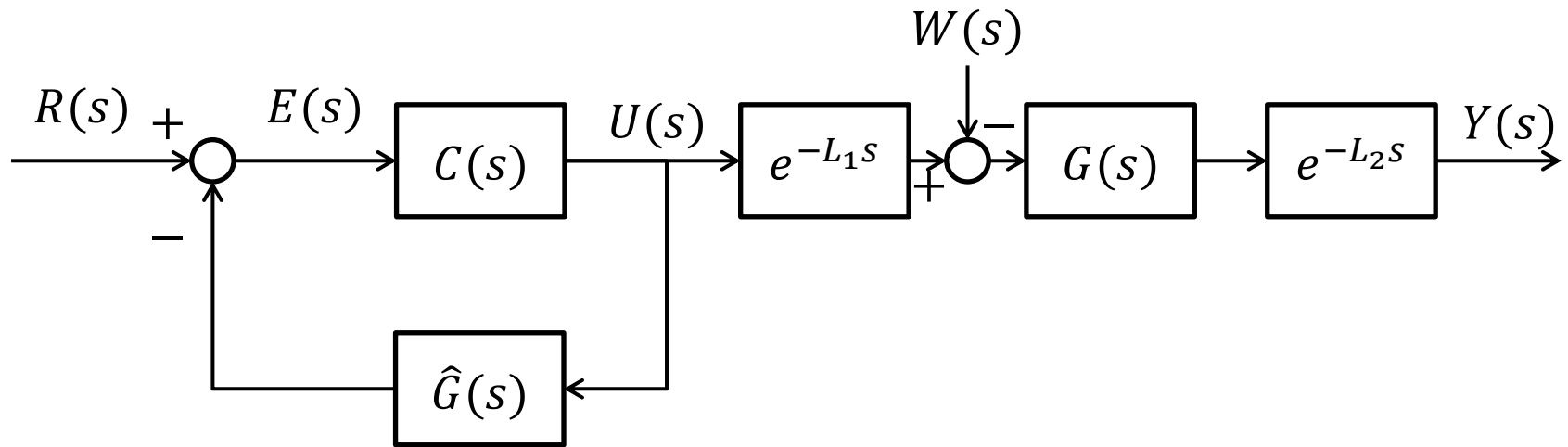
- 提案手法: CDOBスケーリング手法^[2]によるロボット制御
 - 時変むだ時間系における定常偏差の改善
 - 外乱抑圧の検討
 - DOBの適用を実験により検討

2. 浅野洋介, 小山昌人, “出力スケーリング型通信外乱オブザーバによる無線通信フィードバック制御における安定性と外乱抑圧に関する検討”, メカトロニクス制御研究会, MEC-15-011, pp. 59--64, 2015

無線通信制御システム



通信外乱オブザーバCDOB



$g \rightarrow \infty$ として解析

$$Y(s) = \frac{G(s)C(s)e^{-L_1 s}}{1 + \hat{G}(s)C(s)} R(s) + G(s)W(s)e^{-L_2 s}$$

通信外乱オブザーバ

$$Y(s) = \frac{G(s)C(s)e^{-L_1s}}{1 + \hat{G}(s)C(s)} R(s) + G(s)W(s)e^{-L_2s}$$

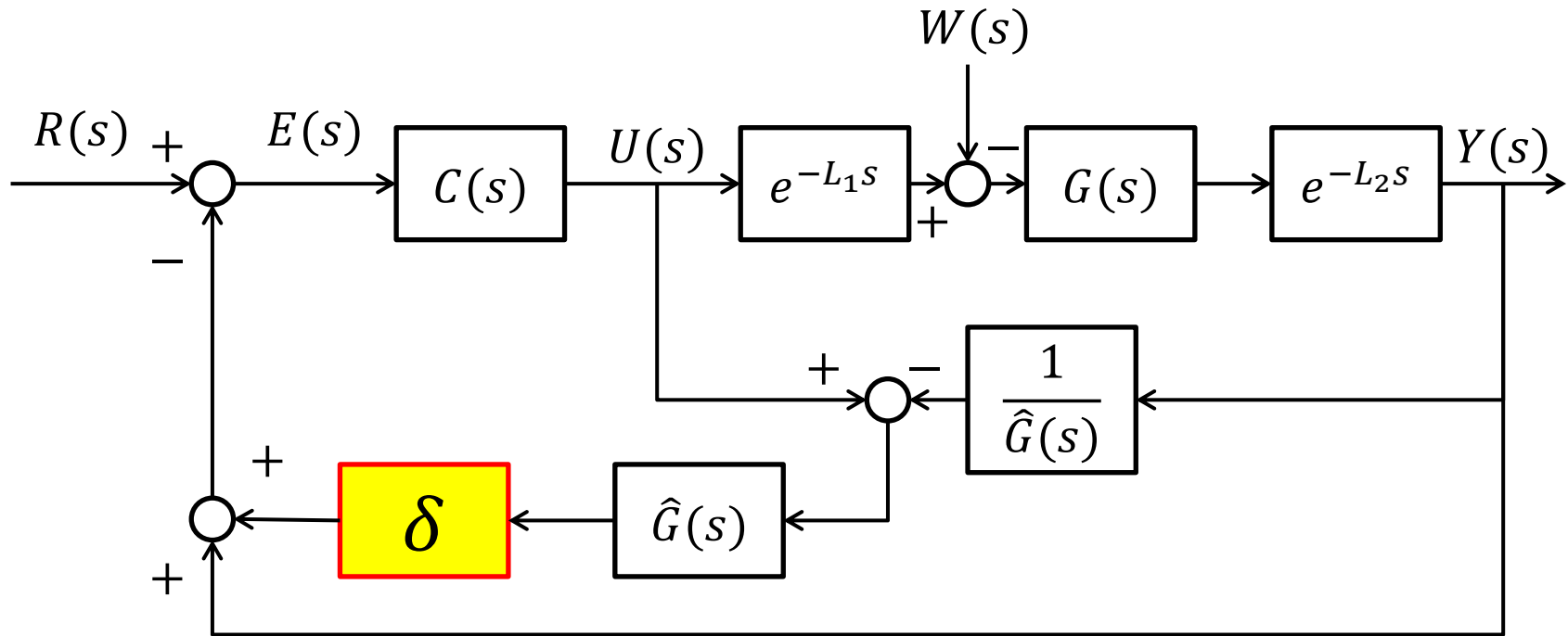
- 特性多項式にむだ時間を含まない
 - 線形制御理論による制御系設計可能
- 出力フィードバックが消滅
 - 外乱抑圧は困難

時変むだ時間系では定常偏差が発生



CDOB出力スケールリング手法の提案

CDOBの出力スケーリング手法



定常偏差の原因を $\hat{G}(s)$ の
モデル化誤差と予想



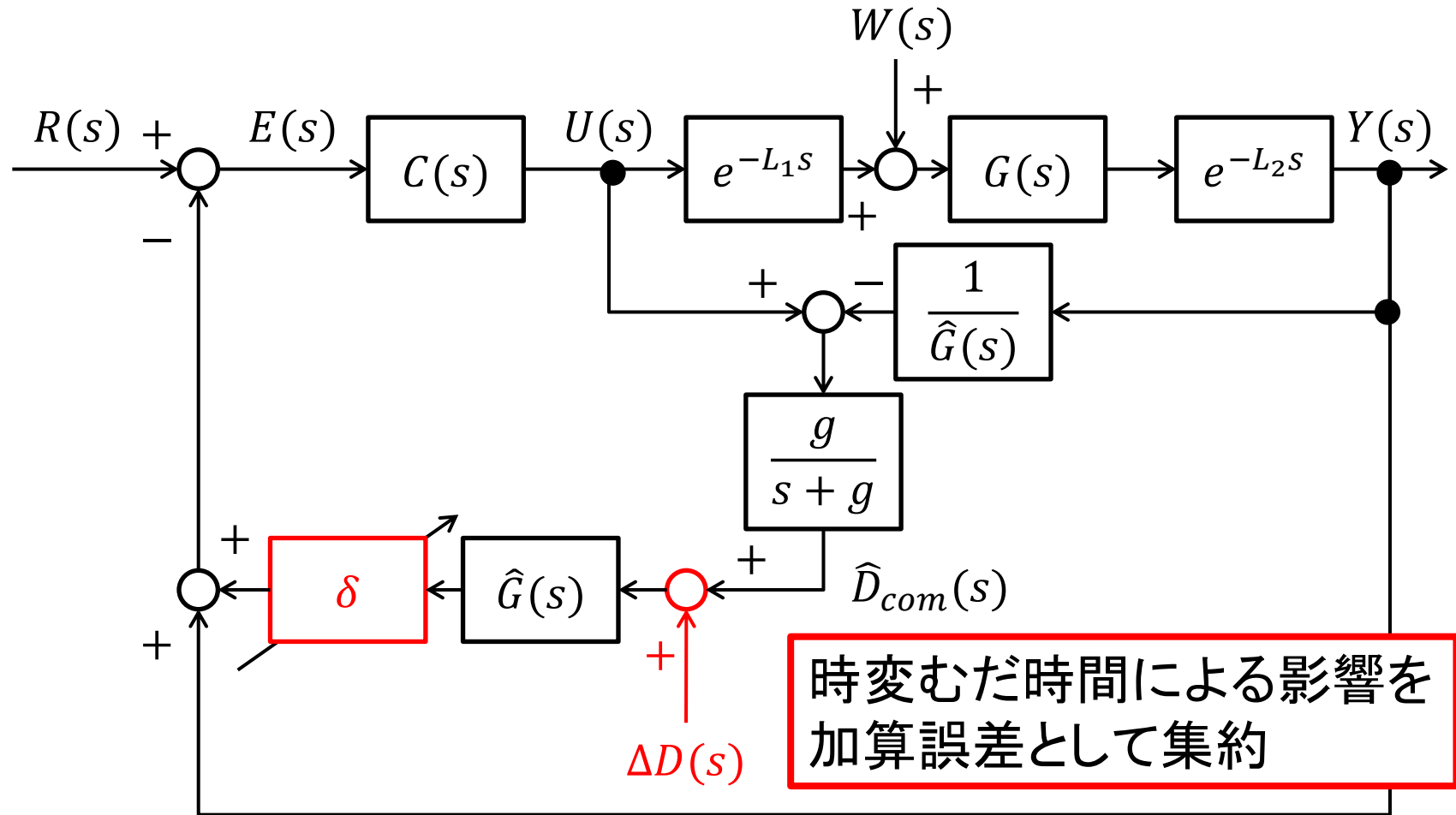
目標値変動を引き起す

スケーリングパラメータ δ により影響軽減

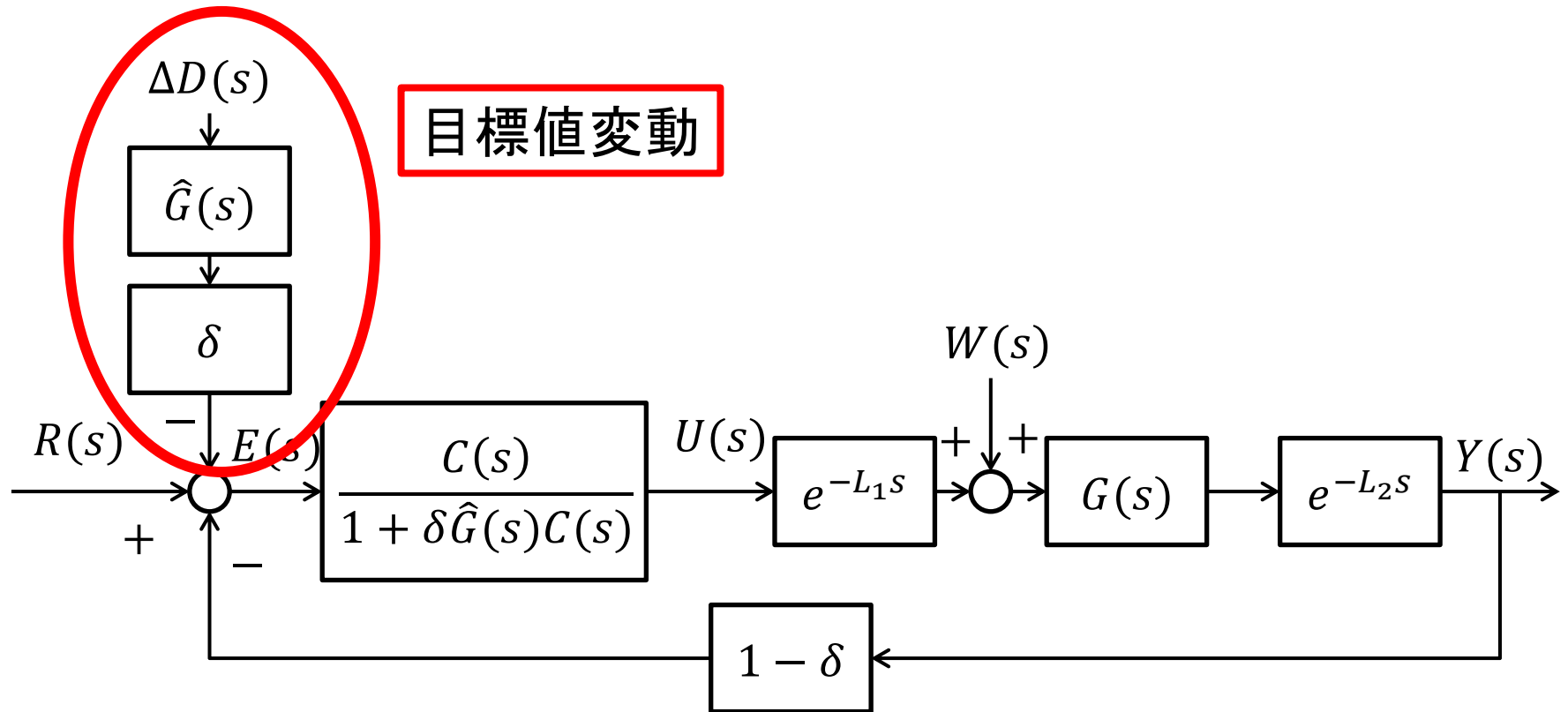
$$\delta = \frac{\delta_1 \cdot e(t)^2}{\delta_2 + e(t)^2}$$

偏差量 $e(t)$ に応じてCDOBの影響を調整

CDOBの出カスケーリング手法の効果



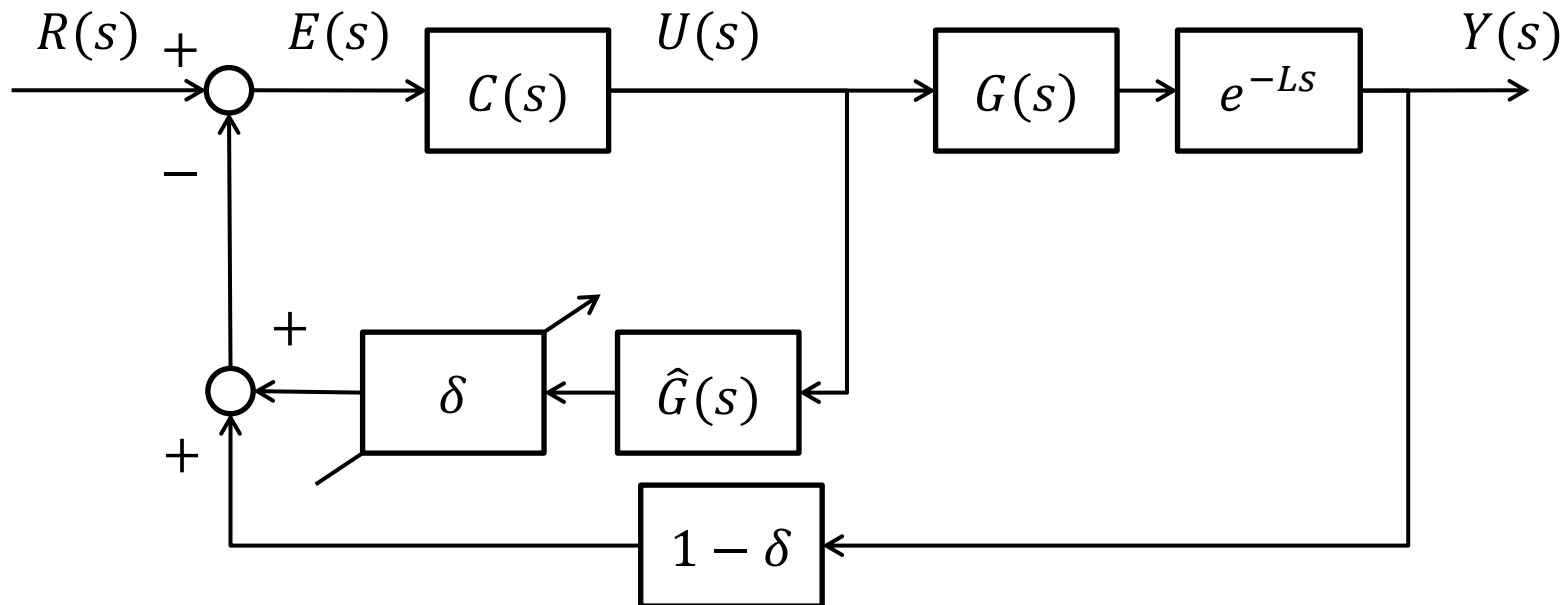
CDOBの出カスケーリング手法の効果



$$\delta = \frac{\delta_1 \cdot e(t)^2}{\delta_2 + e(t)^2}$$

$\delta \rightarrow 0$ にすることで $\Delta D \rightarrow 0$
時変むだ時間の影響を抑圧

スケーリング型CDOBのロバスト安定性



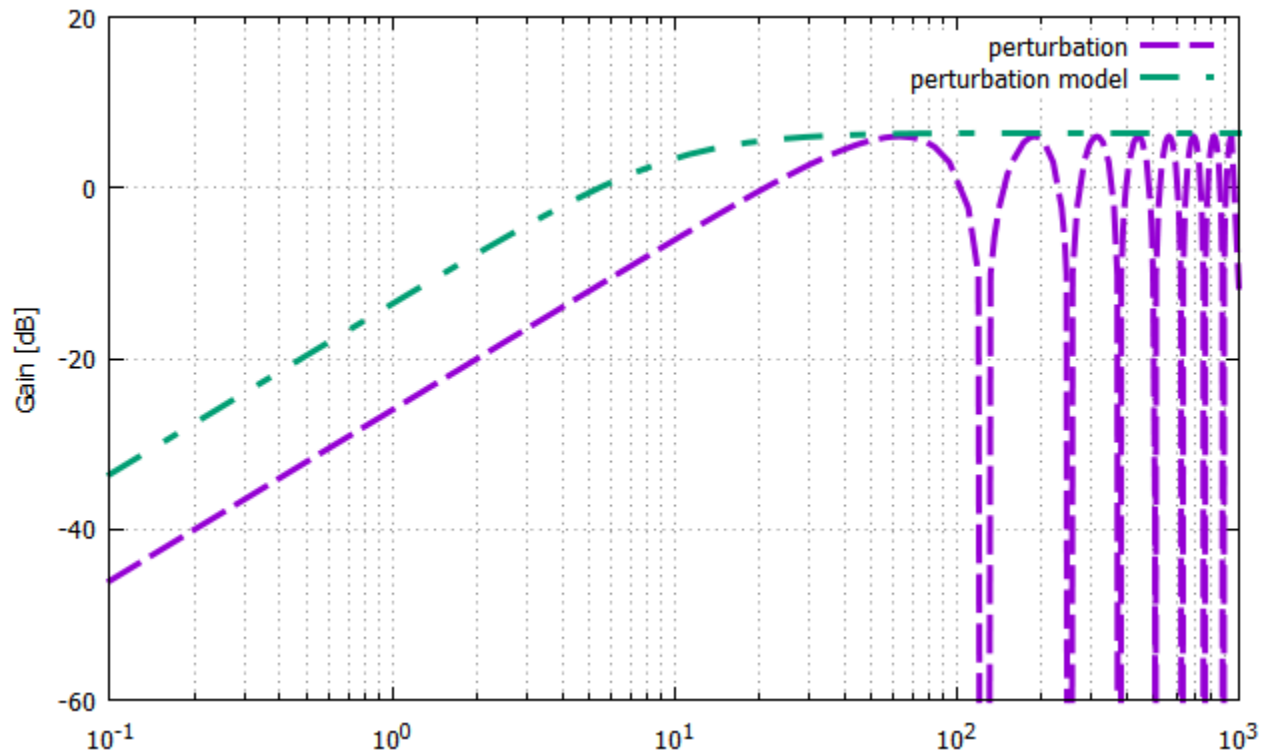
$L \in [L_{\min}, L_{\max}]$ で変動する

$$G(s)e^{-Ls} = G(s)(1 + W_D(s)\Delta_m(s))$$

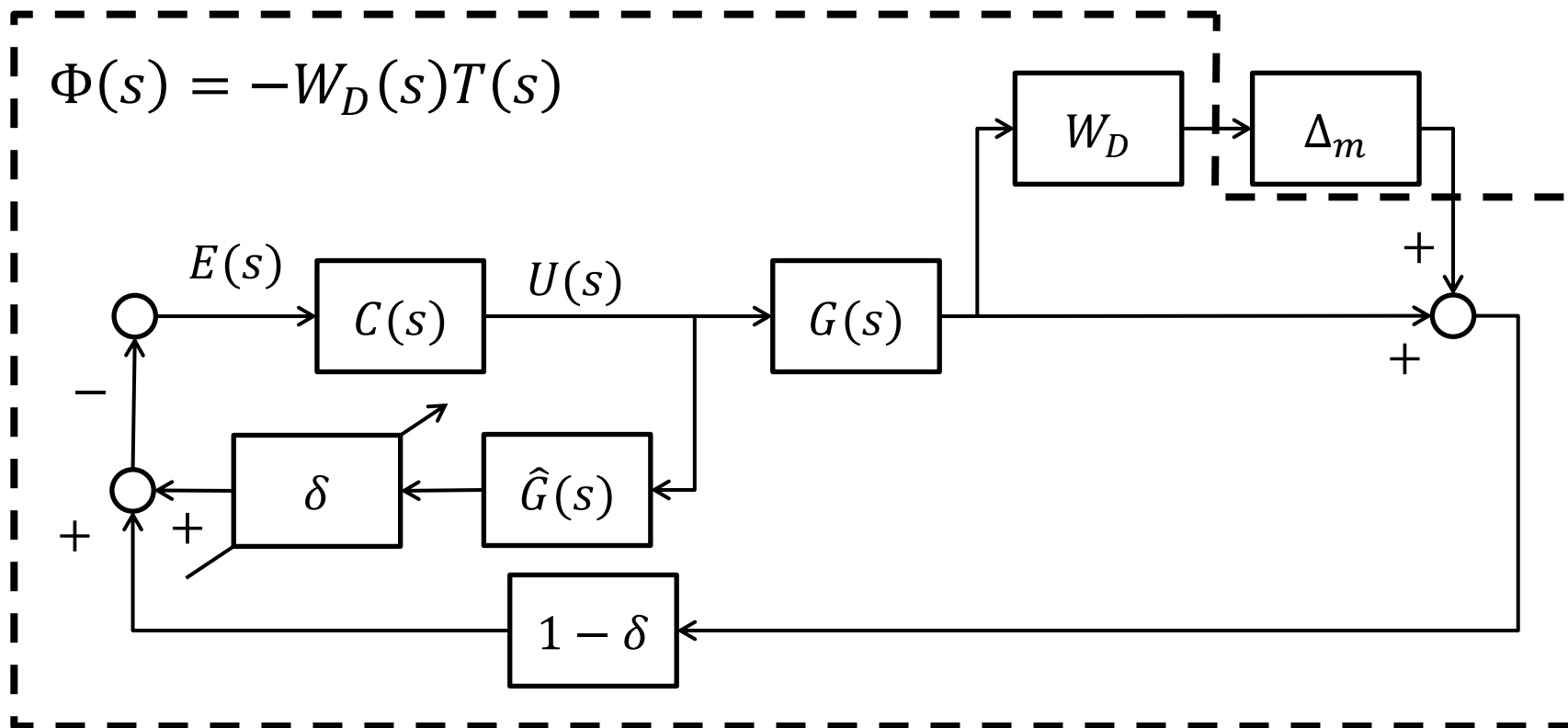
$W_D(s)\Delta_m(s) = e^{-Ls} - 1$ と解釈する

むだ時間の摂動

- $W_D = \frac{2.1s}{s + \frac{1}{L_{max}}}$ と $e^{-Ls} - 1$ の応答



スケーリング型CDOBのロバスト安定性



$$T(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)\hat{G}(s)\delta + C(s)G(s)(1 - \delta)}$$

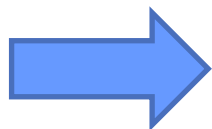
$$\hat{G}(s) = G(s) \text{ とすれば, } T(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

モータ制御での安定性

$$G(s) = \frac{K_T}{s(LJs^2 + RJs + K_E K_T)}$$

$$C(s) = K_P + sK_D, K_P = 0.2, K_D = 0.008$$

スモールゲイン定理から, $\|\Delta_m\|_\infty < 1$ より, $\|\Phi(s)\|_\infty < 1$ ならばシステムは安定



$$\|\phi\|_\infty = 0.8551$$

∴ スケーリング型CDOBはロバスト安定である

CDOBの出カスケーリング手法の定常偏差

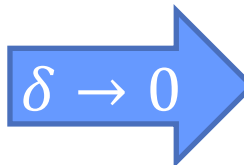
$$Y(s) = \frac{G(s)C(s)(R(s) - \hat{G}(s)\delta\Delta D)e^{-L_1s}e^{-L_2s}}{1 + \delta\hat{G}(s)C(s) + (1 - \delta)G(s)C(s)e^{-L_1s}e^{-L_2s}}$$

$$E(s) = \frac{R(s) - \hat{G}(s)\delta\Delta D}{1 + \delta\hat{G}(s)C(s) + (1 - \delta)G(s)C(s)e^{-L_1s}e^{-L_2s}}$$

目標値 $R(s) = \frac{1}{s}$, $G(s) = \hat{G}(s) = \frac{1}{s(s+a)}$ として最終値の定理

$$y_s = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = 1 - \delta\Delta D(s)$$

$$e_s = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = 0$$



$$y_s = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = 1$$

目標値と一致

見かけ上の定常偏差が0

モータ位置制御シミュレーション

- シミュレーション条件

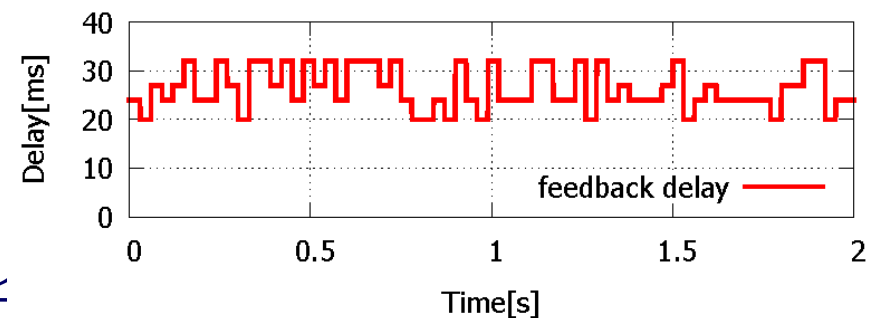
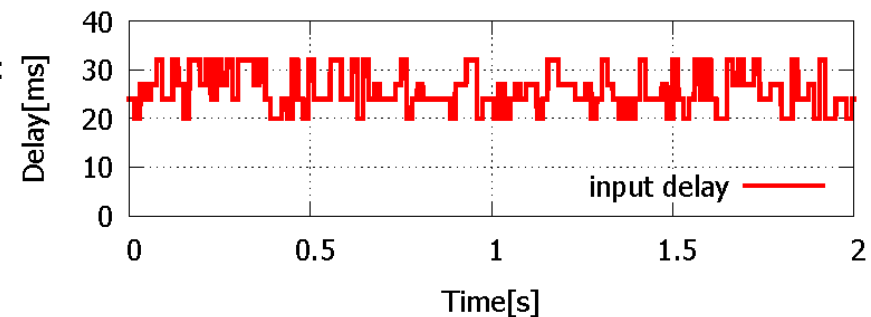
- 制御対象 $G(s)$: DCモータ位置制御
- 制御器 $C(s)$: P制御 ($K_P = 4.46$)
- スケーリングパラメータ: $\delta_1 = 1, \delta_2 = 0.154$
- むだ時間 L_1, L_2
 - 時不変: $L_1 = 15 \text{ ms}$, $L_2 =$
 - 時変: 確率分布に従う

$$J = 67.6 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$$

$$K_T = K_E = 19.4 \text{ mNm/A}$$

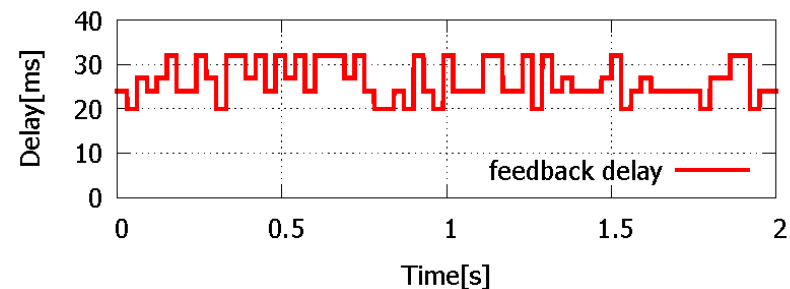
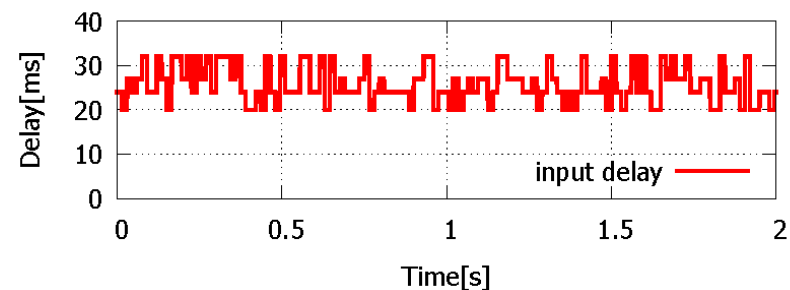
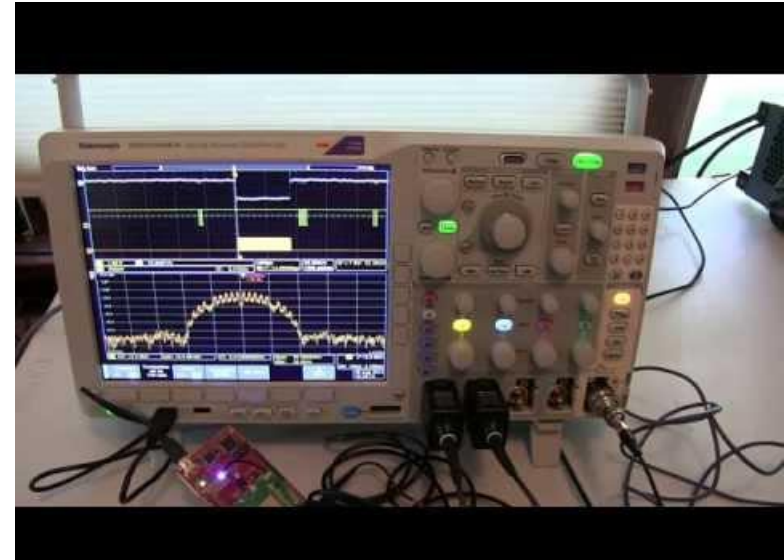
$$L = 676.0 \text{ } \mu\text{H}$$

$$R = 334 \text{ m}\Omega$$



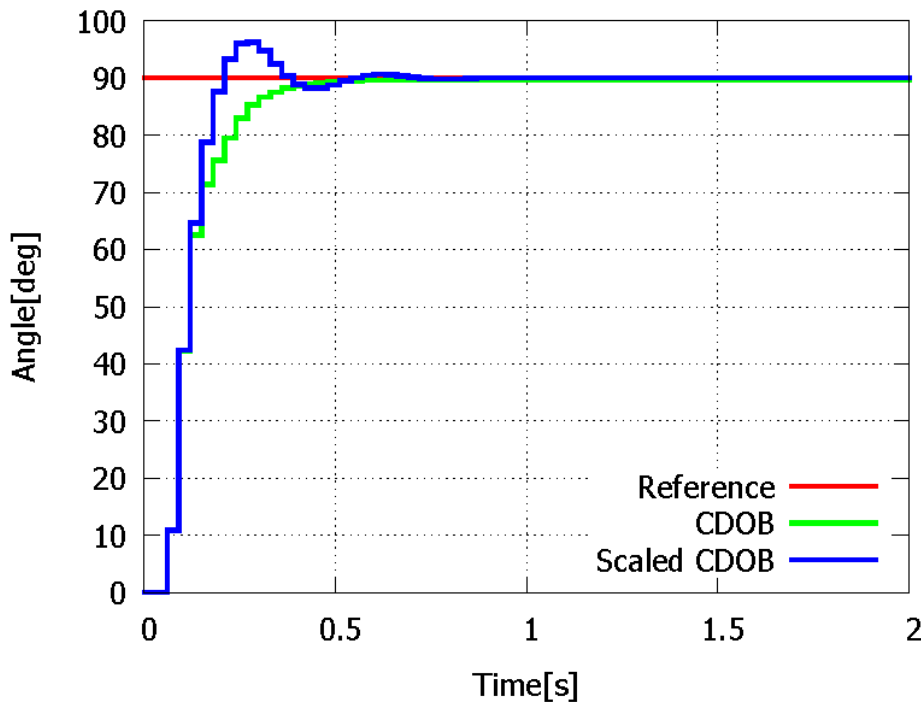
むだ時間の計測

- ミックスドドメインオシロスコープ(テクトロニクス)
 - アナログ+ロジアナ+スペアナ
 - アナログ 4ch(350MHz)
 - デジタル16ch
 - RF:3GHz
 - I2C/SPI, RS-232C, Ethernet 解析可能
- PC側の出力とマイコン側の入力を計測



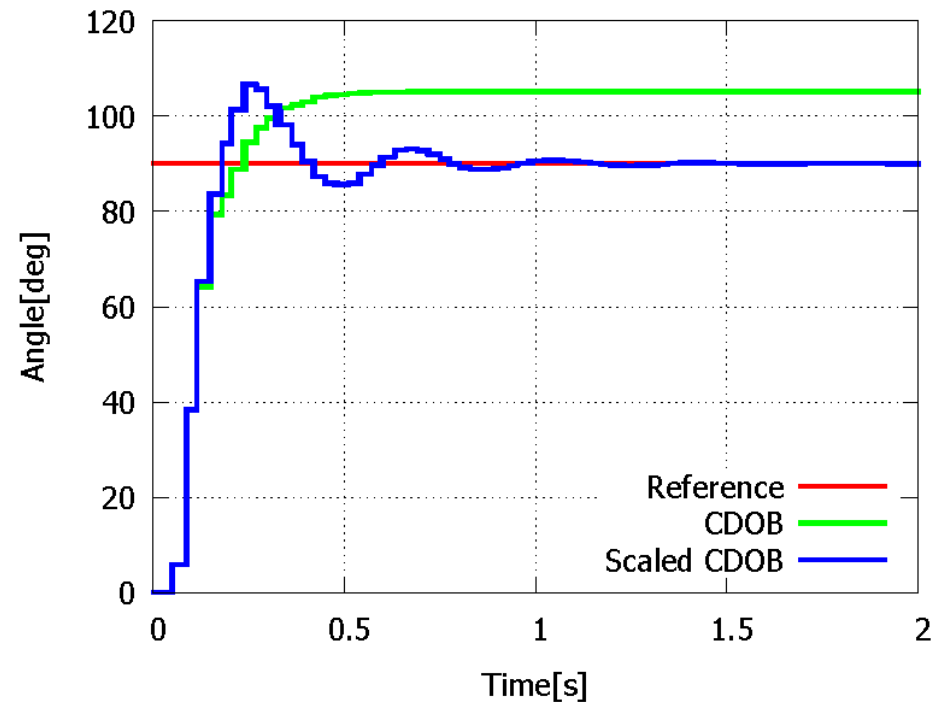
モータ位置制御シミュレーション

時不変むだ時間系



CDOB: 定常偏差なし
CDOB+スケーリング: 定常偏差なし

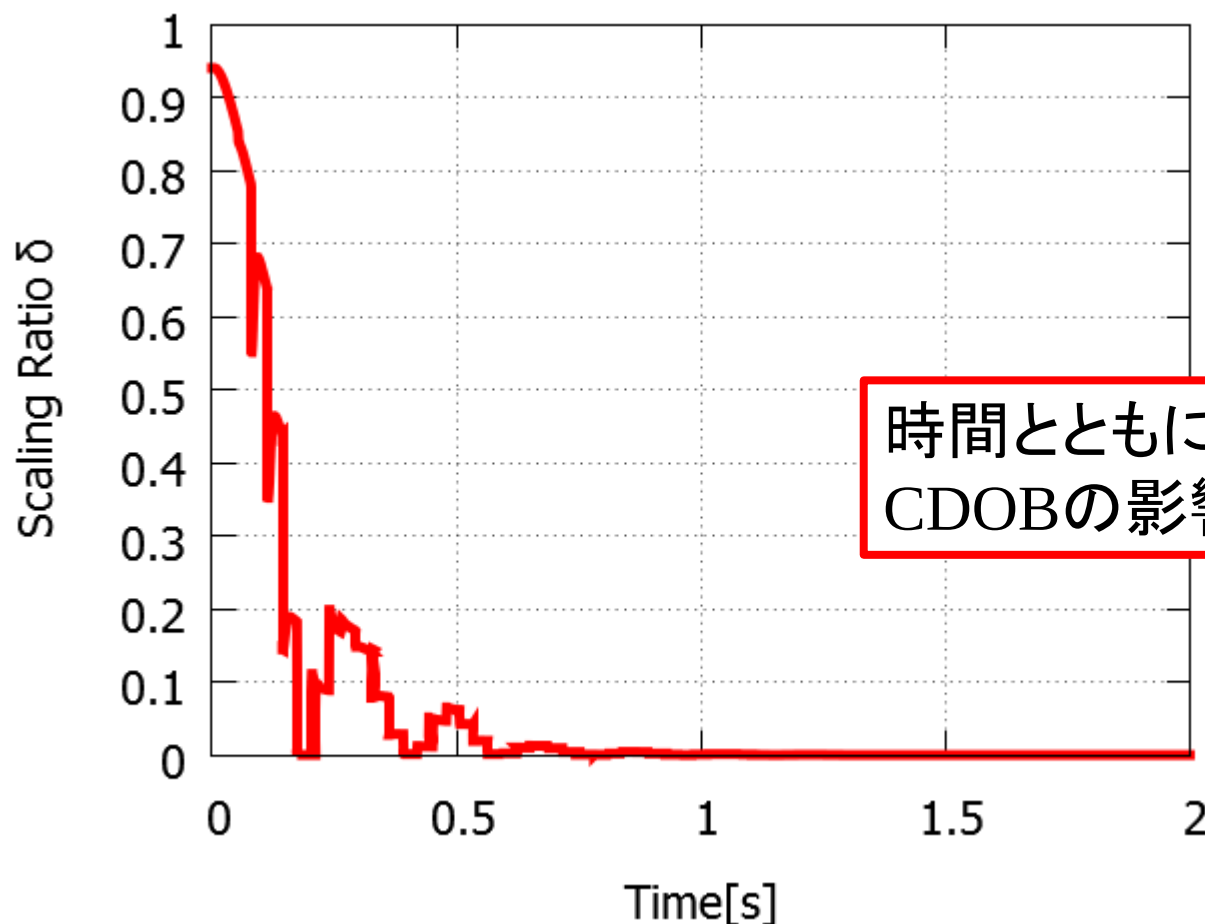
時変むだ時間系



CDOB: 定常偏差発生
CDOB+スケーリング: 定常偏差なし

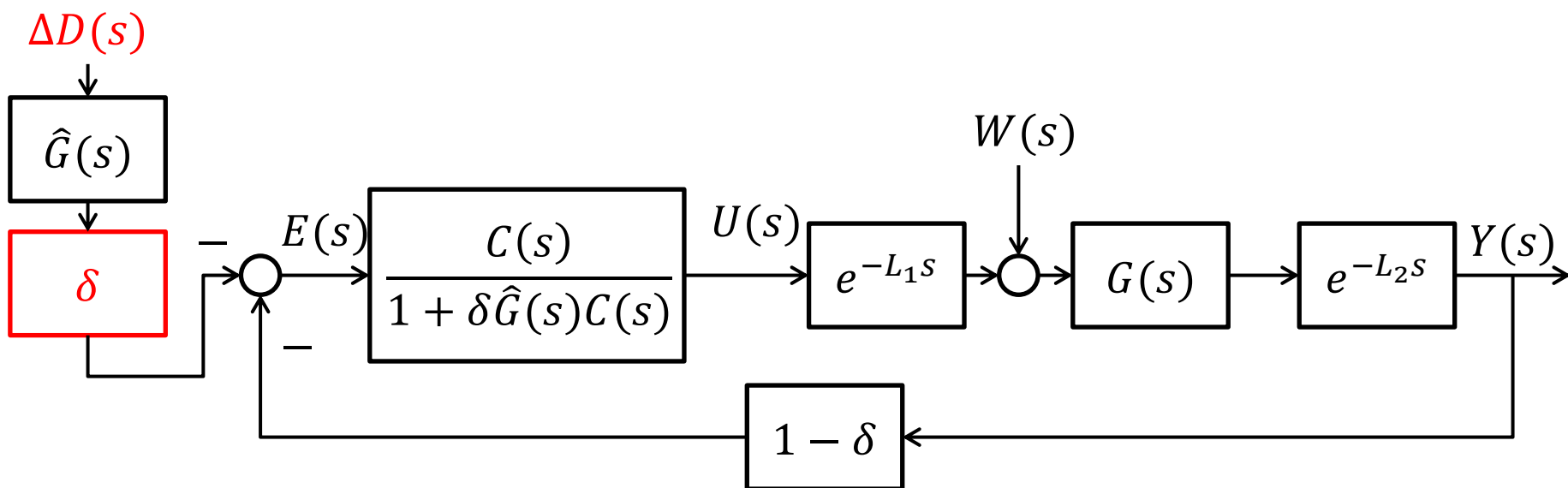
時変むだ時間におけるシミュレーション

- スケーリング比の遷移



時間とともに $\delta \rightarrow 0$
CDOBの影響を減少させる

CDOBの出カスケーリング手法の外乱抑圧



$$Y(s) = - \frac{G(s) \left(1 + \delta \hat{G}(s) C(s) \right) e^{-L_2 s}}{1 + \delta \hat{G}(s) C(s) + (1 - \delta) G(s) C(s) e^{-L_1 s} e^{-L_2 s}} W(s)$$

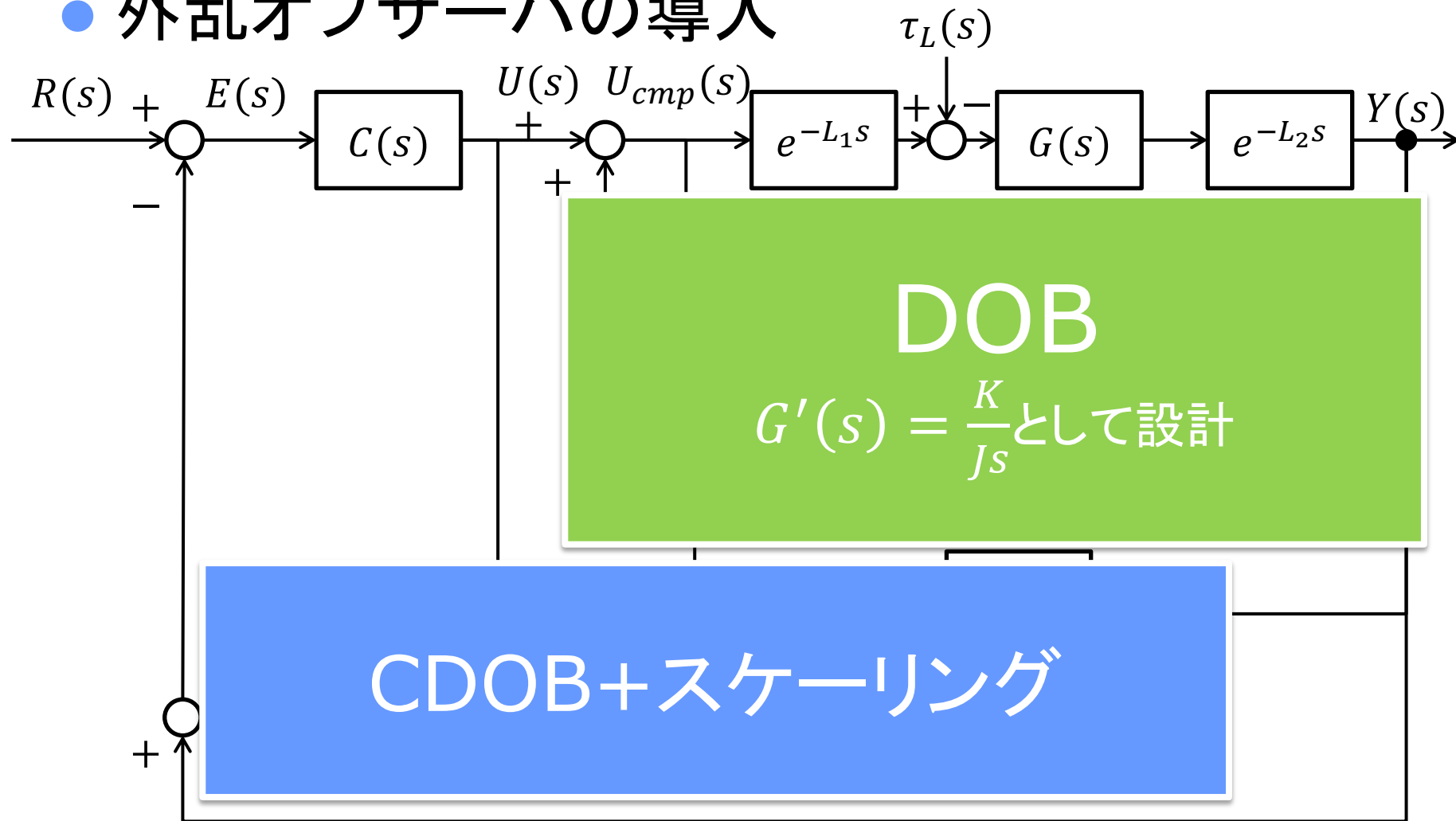
外乱 $W(s) = \frac{1}{s}$, $G(s) = \hat{G}(s) = \frac{1}{s(s+a)}$, $\delta \rightarrow 0$ として最終値の定理

$$y_w = \lim_{s \rightarrow 0} s Y(s) = \frac{1}{C(s)}$$

コントローラにより
ある程度外乱抑圧可能

外乱オブザーバの追加による外乱抑圧

- 外乱オブザーバの導入



外乱による定常偏差

- 外乱-出力伝達関数

- CDOB+DOB

$$Y(s) = \frac{sGe^{-L_2s}}{s + g_{dis}e^{-L_1s}e^{-L_2s}}(-W(s))$$

- CDOBスケールリング+DOB

$$Y(s) = \frac{sG(1 + \delta GC)e^{-L_2s}}{s(1 + \delta GC) + (g_{dis} + g_{dis}\delta GC + GC(s + g_{dis})(1 - \delta))e^{-L_1s}e^{-L_2s}}(-W(s))$$

制御の過程で $\delta \rightarrow 0$ となる

$$Y(s) = \frac{sGe^{-L_2s}}{s + (g_{dis} + GC(s + g_{dis}))e^{-L_1s}e^{-L_2s}}(-W(s))$$

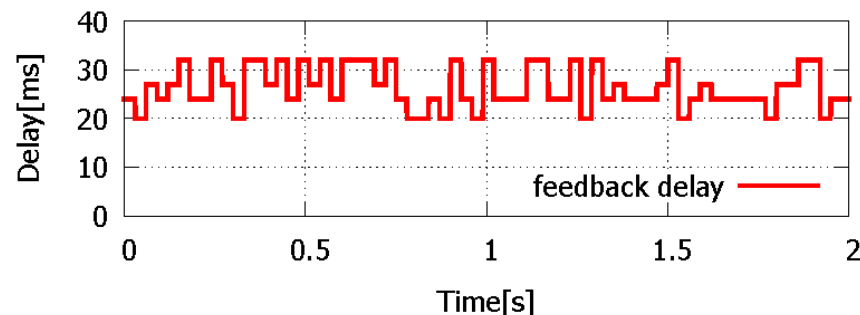
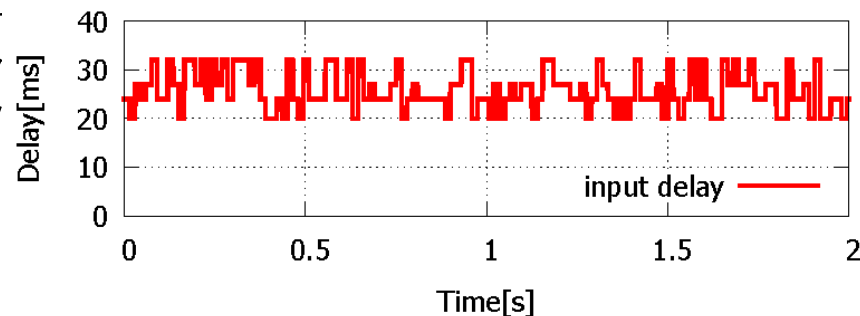
外乱応答定常偏差

	0形1次遅れ系 $\frac{1}{s+a}$	1形1次遅れ系 $\frac{1}{s(s+a)}$
CDOB+DOB	0	$\frac{1}{ag_{dis}}$
CDOBスケーリング +DOB	0	$\frac{\delta}{ag_{dis}} \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} 0$

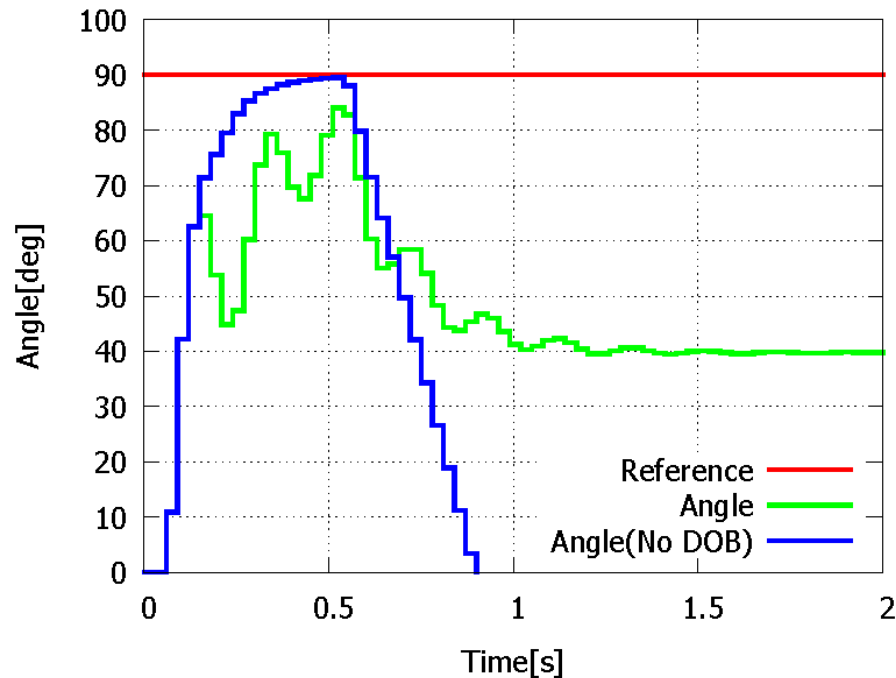
外乱応答シミュレーション

- シミュレーション条件

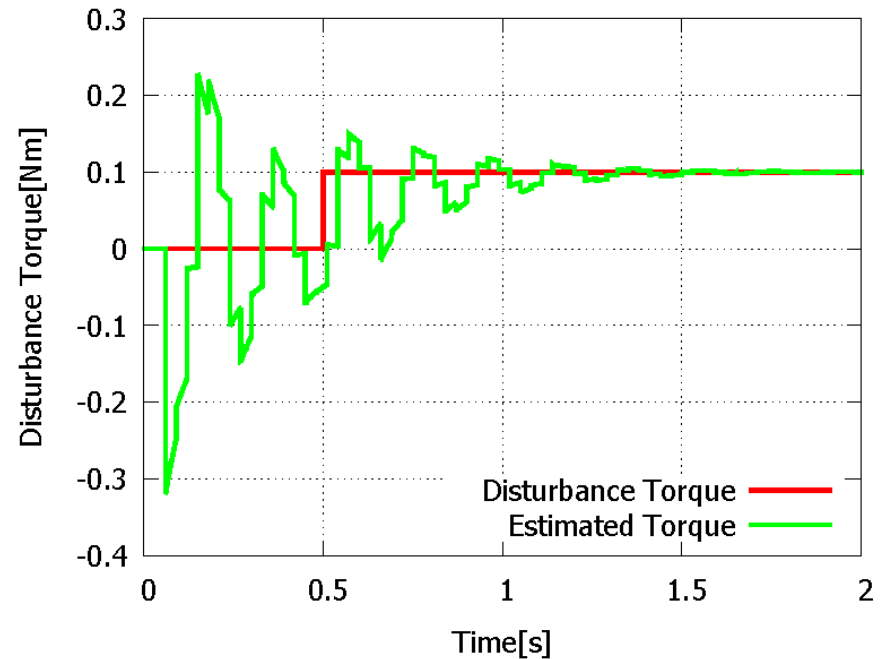
- 制御対象 $G(s)$: DCモータ位置制御 (1形2次遅れ系)
- 外乱トルク $\tau_d = 0.1 \text{ Nm}$ ($t = 0.5 \text{ s}$ のとき)
- 制御器 $C(s)$: P制御 ($K_P = 4.46$)
- スケーリングパラメータ: $\delta_r = 1$ $\delta_n = 0.154$
- 外乱オブザーバ遮断周波
- むだ時間 L_1, L_2
 - 時変: 確率分布に従う



時不変むだ時間 CDOB+DOB

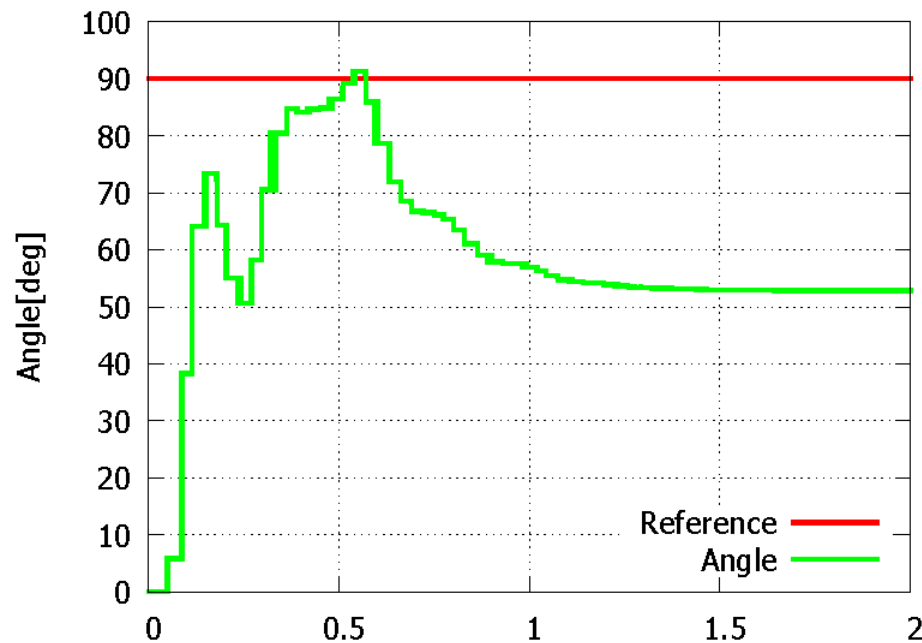


CDOB: 発散
CDOB + DOB: 定常偏差発生

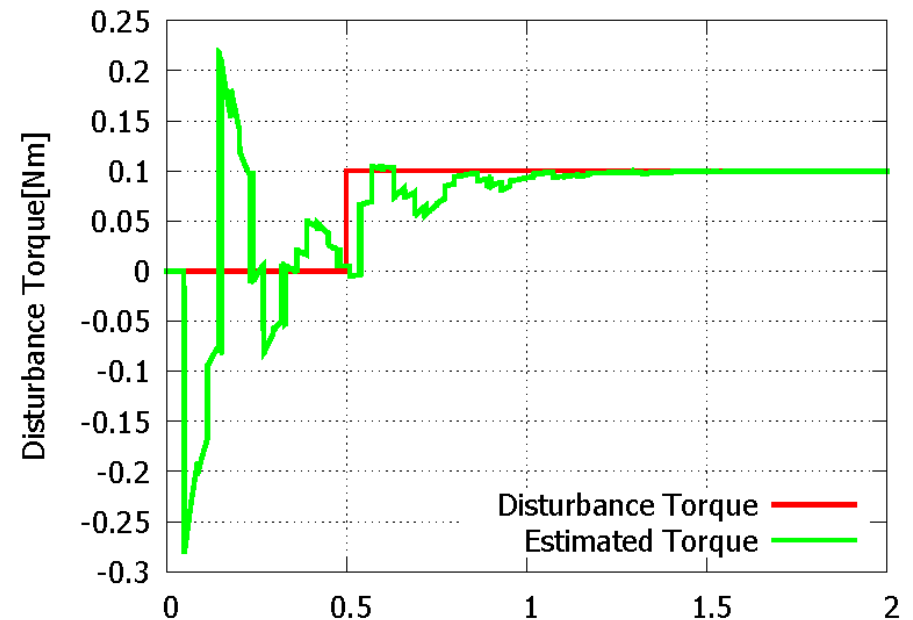


外乱推定は可能
むだ時間による振動

時変むだ時間 CDOB+DOB

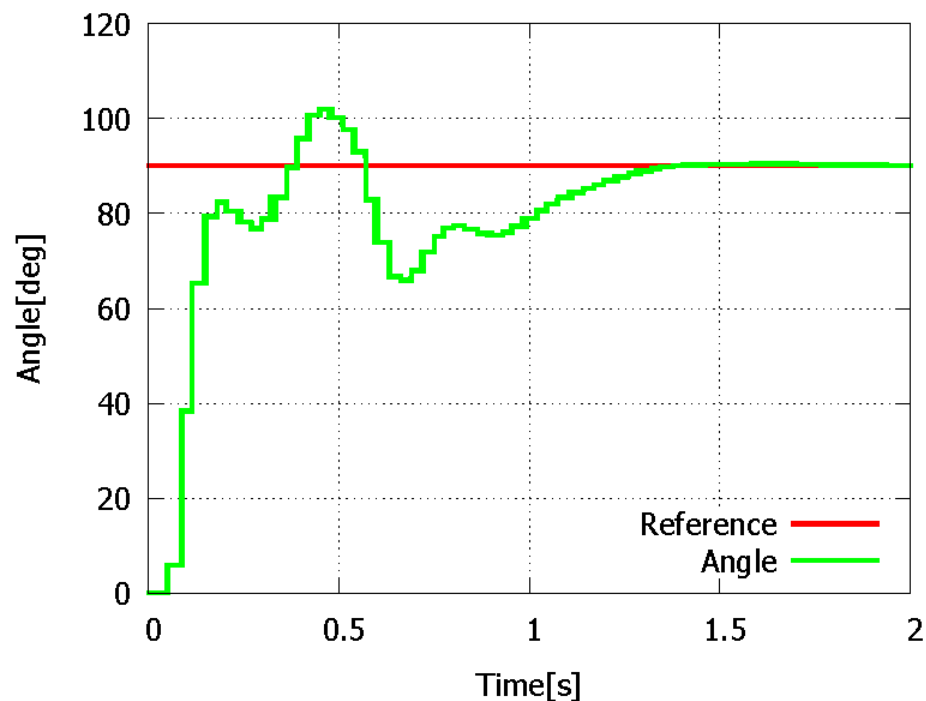


CDOB+DOB: 定常偏差発生

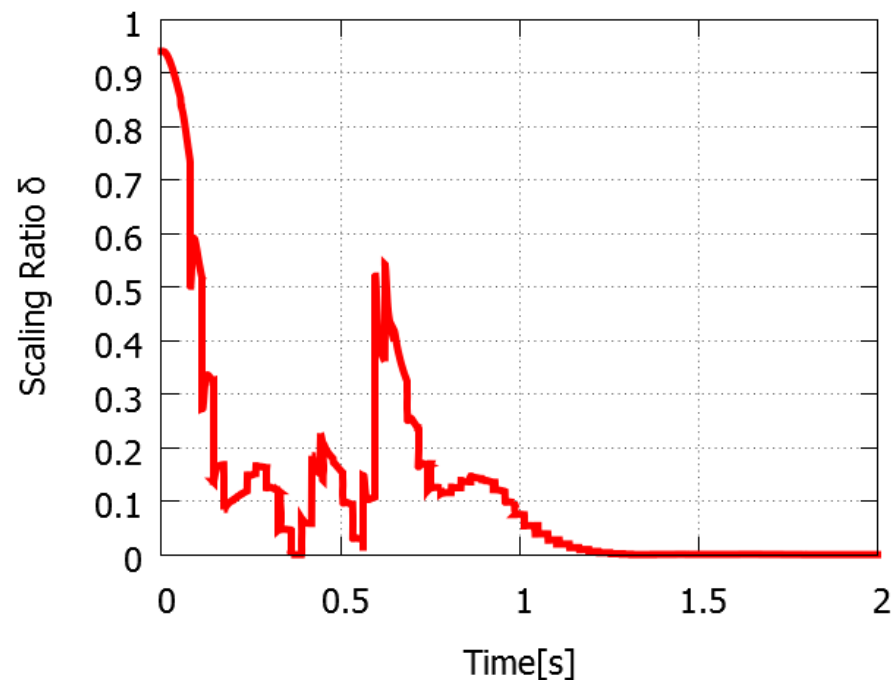


外乱推定は可能
むだ時間による振動

時変むだ時間 CDOBスケールリング+DOB

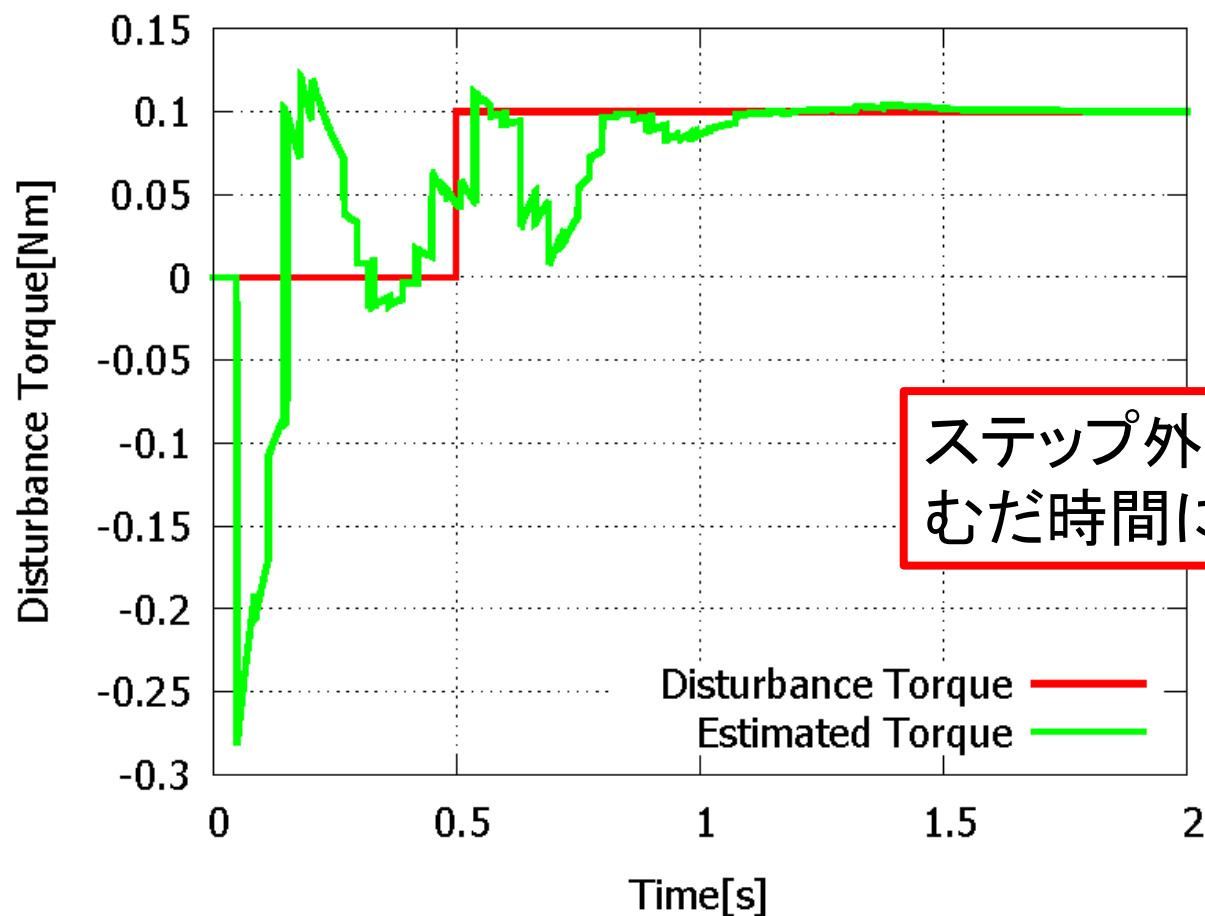


CDOBスケールリング+DOB:
定常偏差なし



時間とともに $\delta \rightarrow 0$
CDOBの影響を減少させる

時変むだ時間 CDOBスケーリング+DOB

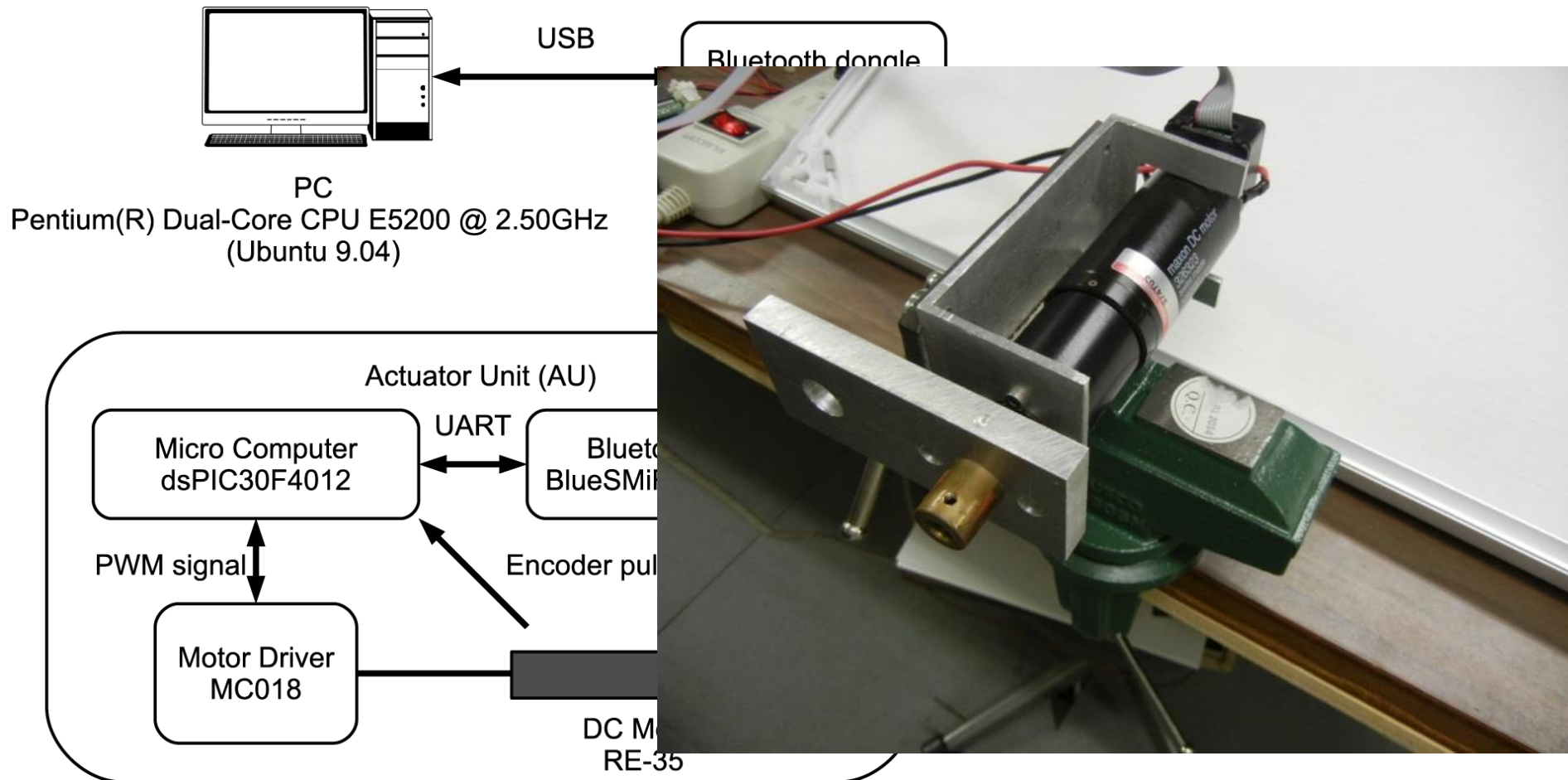


シミュレーション結果のまとめ

	ステップ外乱応答	ステップ外乱推定	評価
CDOBのみ	発散	○	×
CDOB+DOB	定常偏差発生	○	△
CDOBスケーリング +DOB	○	○	◎
CDOB+スケーリング	定常偏差発生	-	△

提案手法により十分な性能を発揮

実機実験による検証

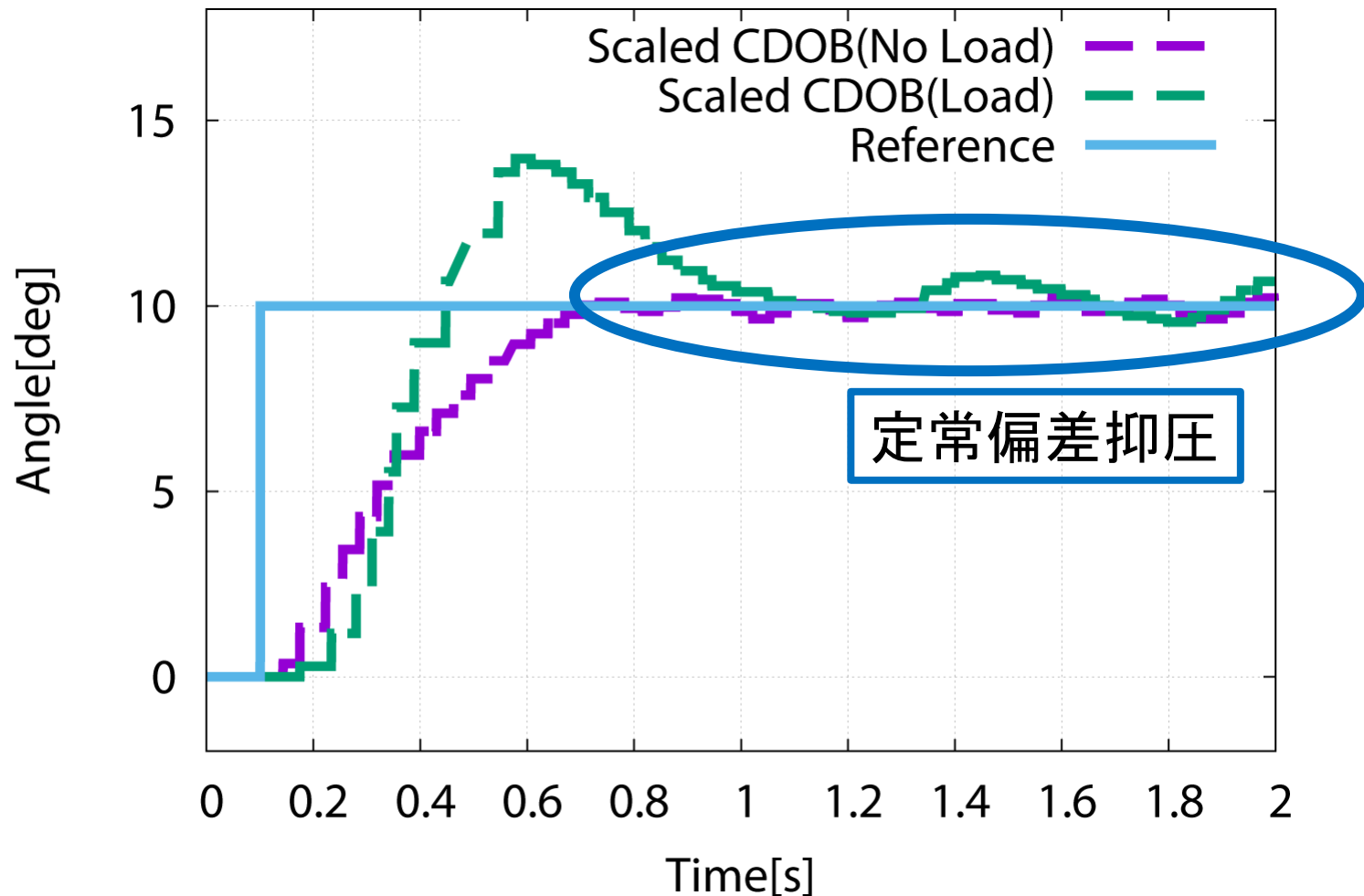


実験条件

- DCモータ位置制御(1形2次遅れ系)
- 制御器 $C(s)$: P制御($K_P = 40$)
- スケーリングパラメータ: $\delta_1 = 1, \delta_2 = 20$
- CDOB遮断周波数 $g_{dis} = 400$ Hz
- 外乱オブザーバ遮断周波数: $g_{dis} = 200$ Hz
- むだ時間 L_1, L_2 : 時変

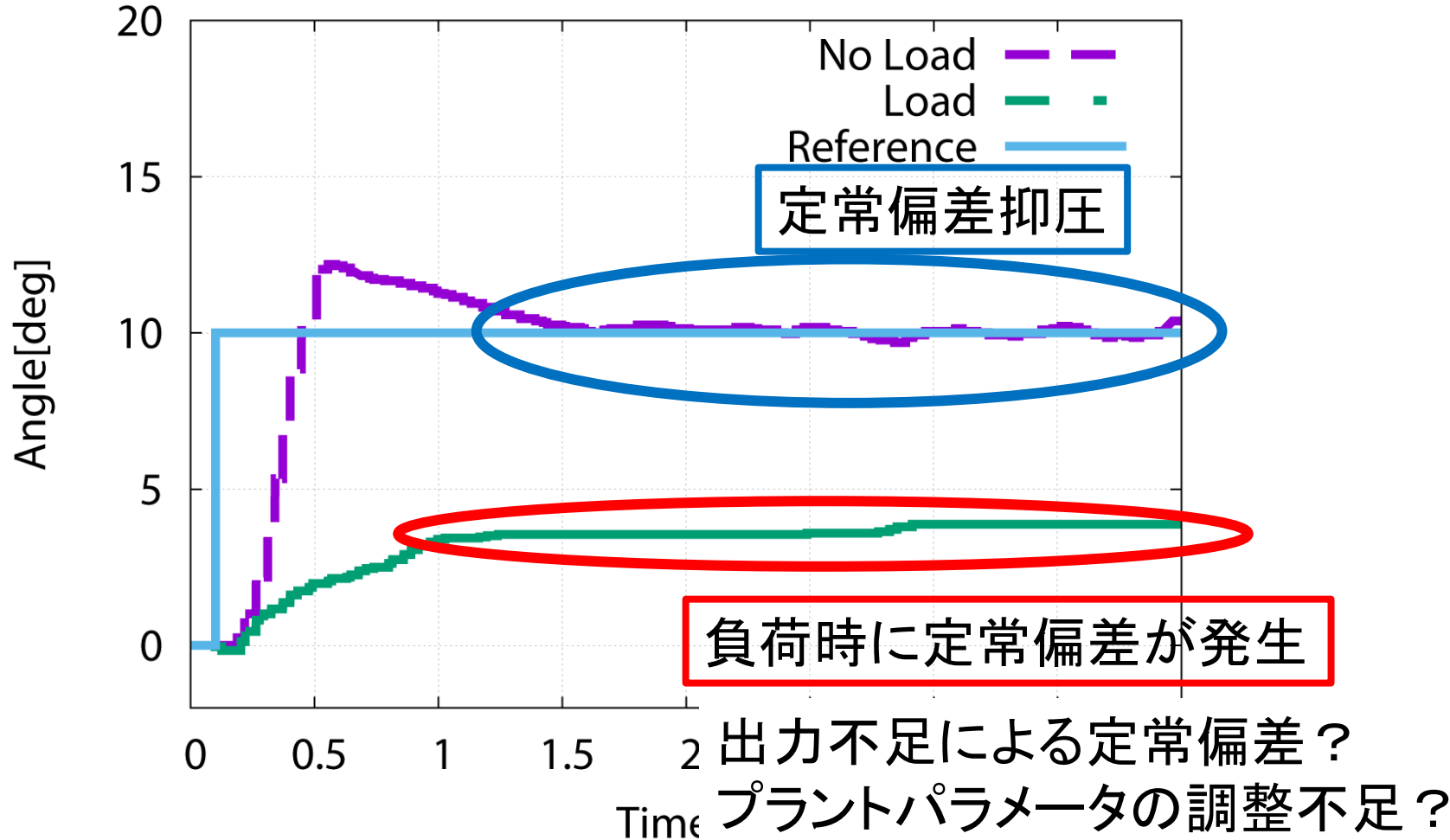
負荷試験

- スケーリング型CDOB



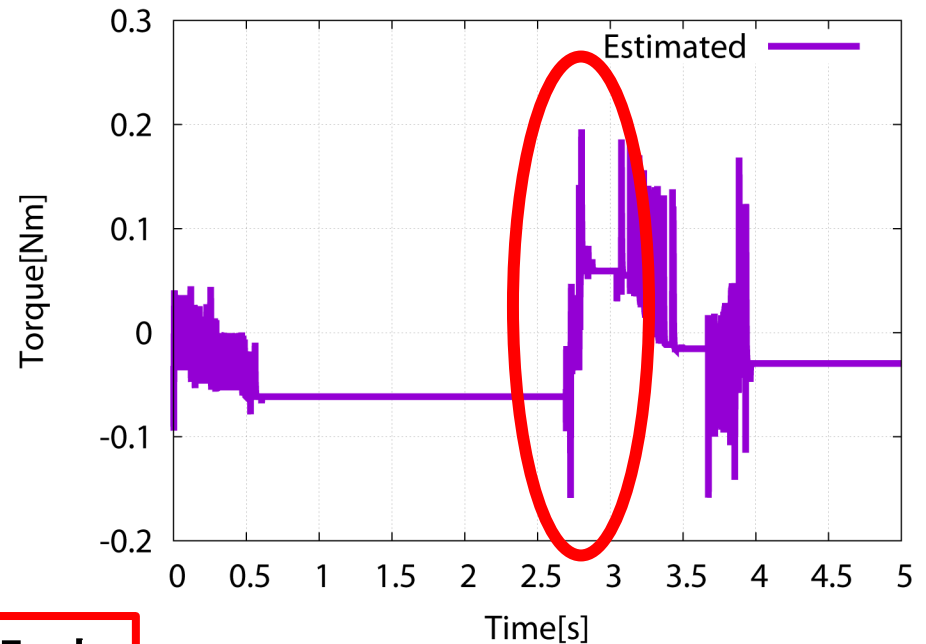
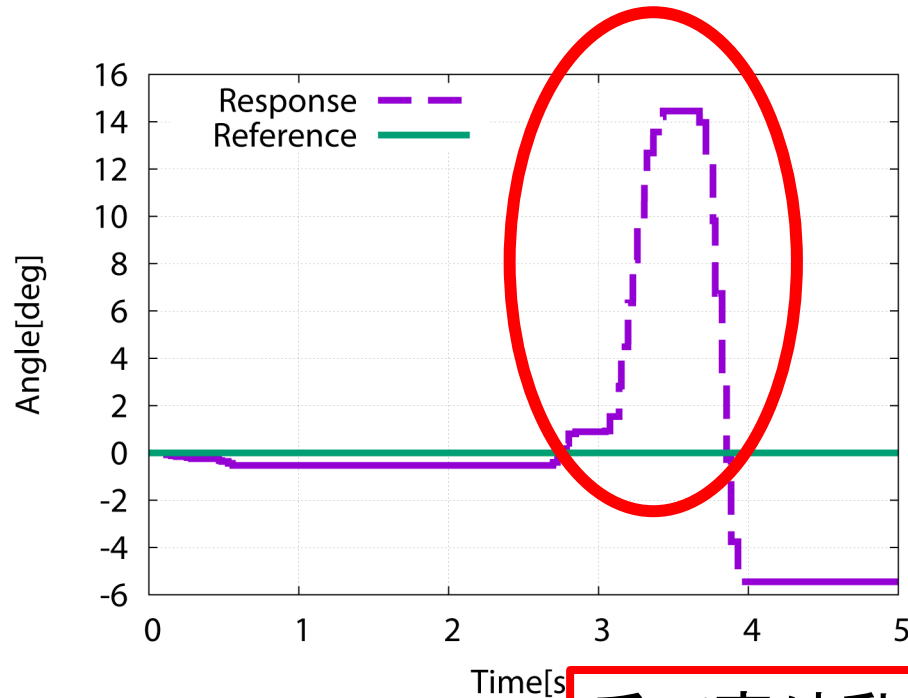
負荷試験

- スケーリング型CDOB+DOB



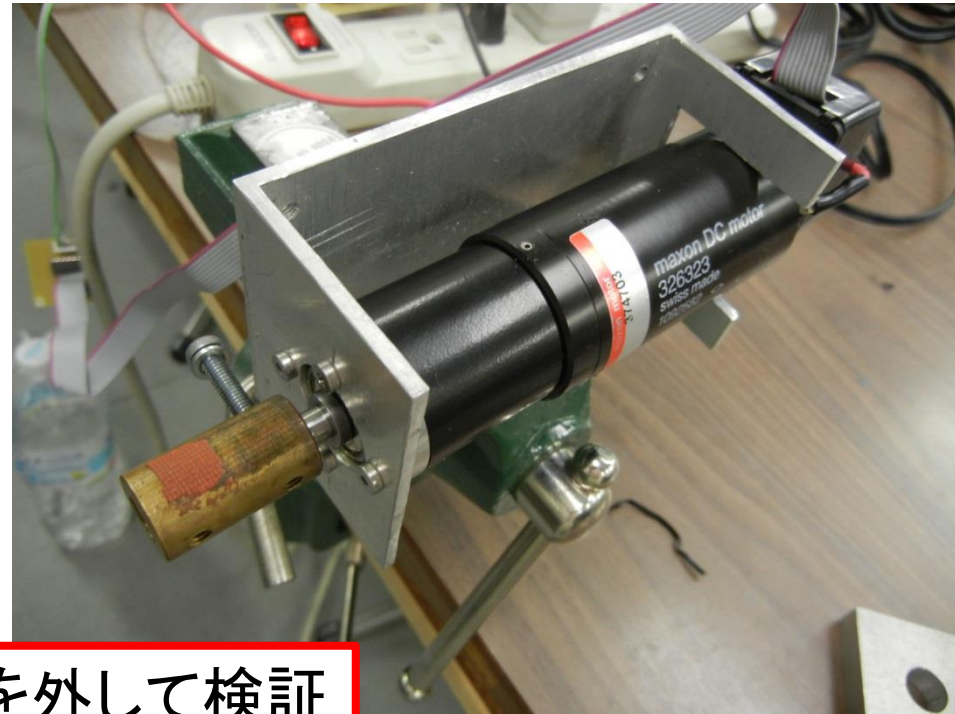
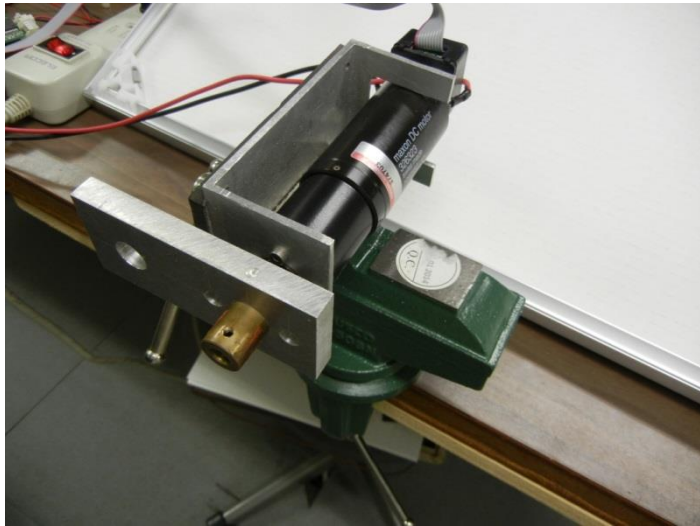
外乱入力による応答

- スケーリング型CDOB+DOB



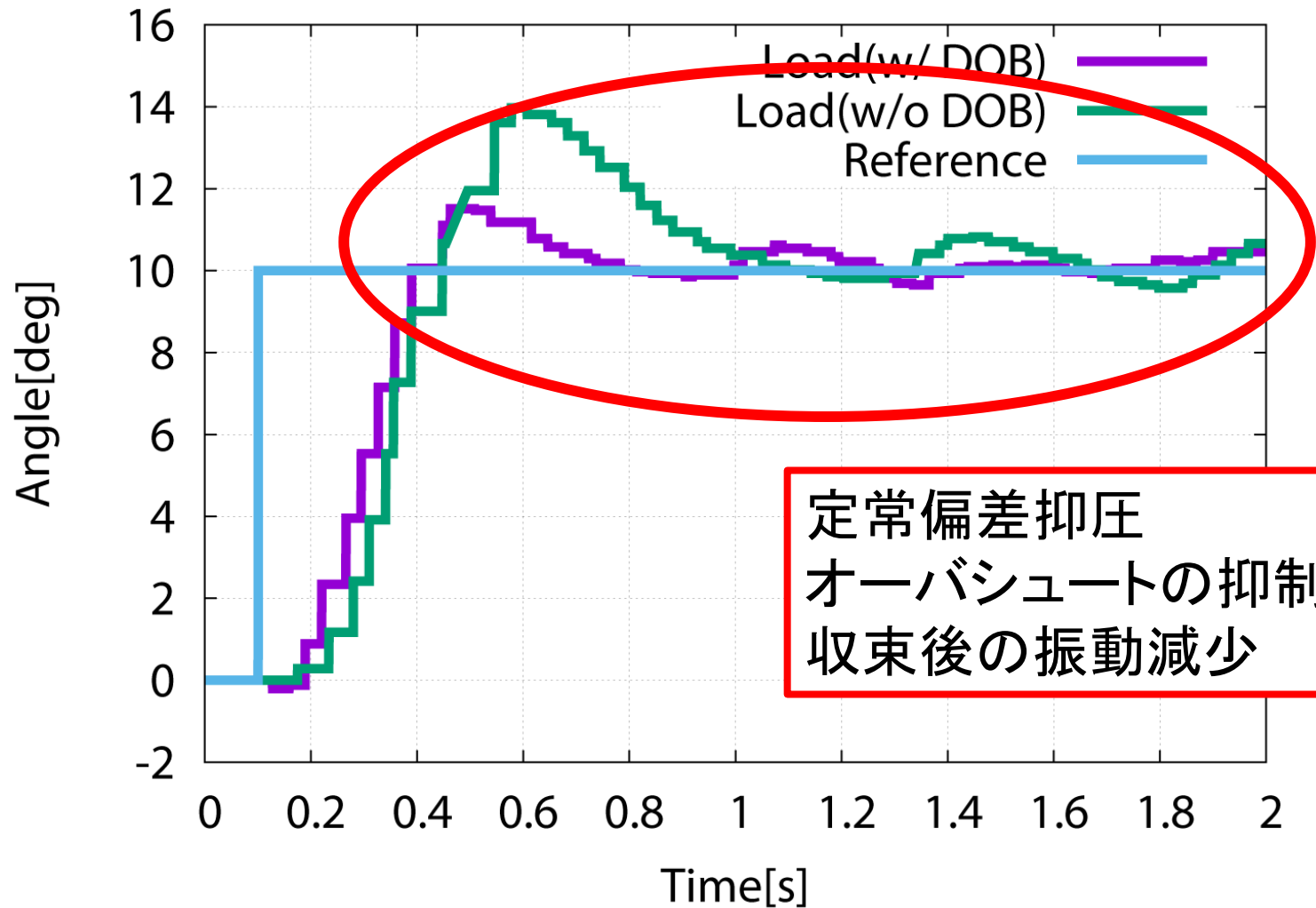
手で実外乱入力

軽負荷による実験



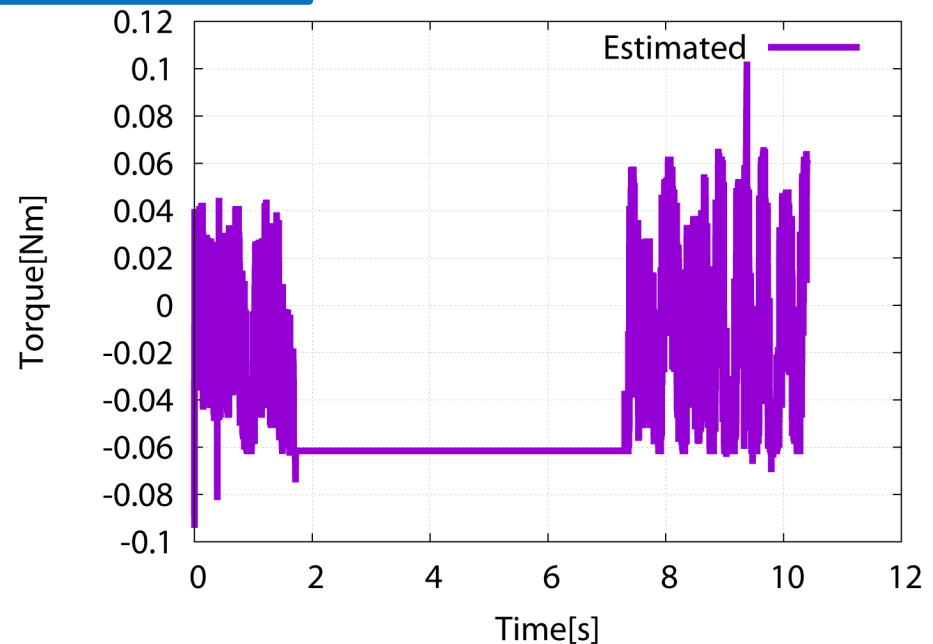
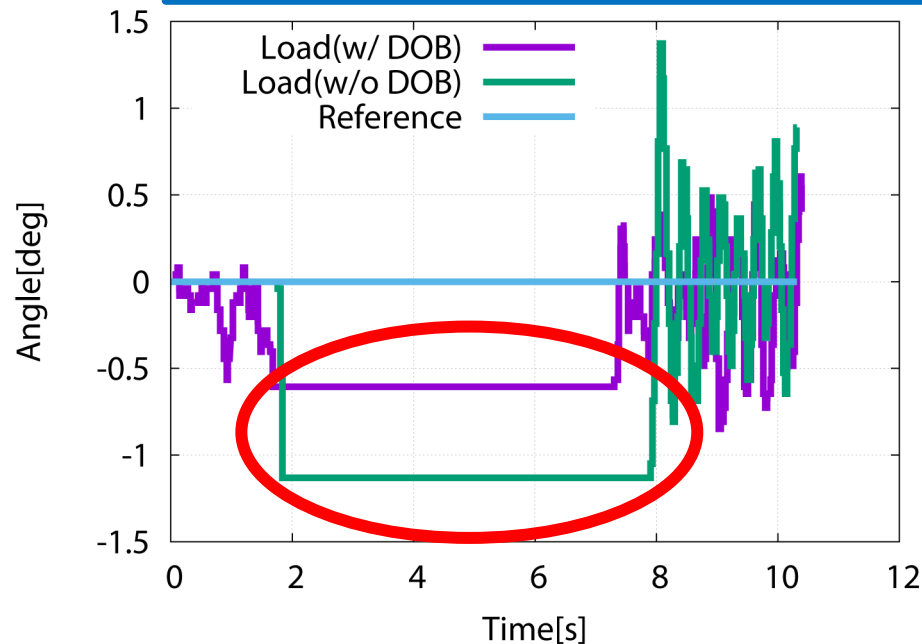
アルミブロックを外して検証

軽負荷試験



ステップ外乱による応答

500 gの負荷を軸から20 mmに取り付け



負荷による変動を抑圧

実験結果の考察

- スケーリング型CDOB＋外乱オブザーバ
 - 定常偏差抑圧
 - 外乱抑圧性能向上
- 負荷試験の定常偏差
 - パワー不足により性能試験幅が制限
 - システム同定によるパラメータの再設定の必要性

まとめと今後の課題

- スケーリング型CDOB＋外乱オブザーバ
 - 安定性と定常特性の検討
 - 時変むだ時間系においても実外乱抑圧可能
 - 実機実験による検討
- 今後の課題
 - 制御対象のシステム同定
 - 多自由度システムの構築
 - ロボットシステムの制御（車輪型，飛行型など）