Predictive Teleoperation of Constrained Dynamic Systems Via Internet-Like Channels
の論文紹介

FL07ー12ー1

07/02/2007

芥川浩之

Outline

1.**概要**
2.MASTER/SLAVE COMMAND GOVERNOR DEVICE
3.BASIC COMMAND GOVERNOR STRATEGY
4.DISTRIBUTED COMMAND GOVERNOR STRATEGY
5.**シミュレーション**
6.**まとめ**

1.概要

テレオペレーションとは？

⇒ オペレーターが手元(master側)の装置を操作することで遠隔地(slave側)にある装置を操作すること

対象：宇宙、海中、原子炉などの極限空間
火災や地震で人が近づけないところ（被災地)

問題：通信の時間遅れ

⇒ 拘束条件を満たしつつ安定性を確保できるか？

1.概要

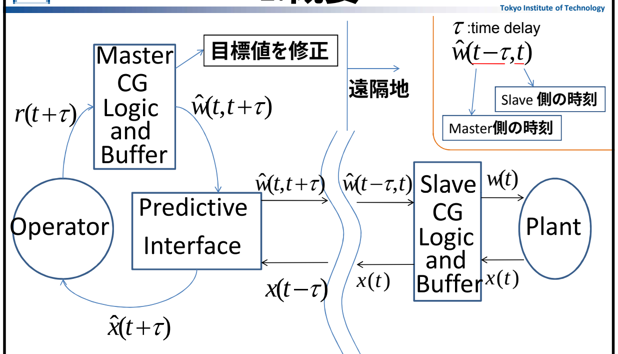


Fig.1. Predictive interface with constrains enforcing capability

---

1.概要

Master Command Governor**の役目**

⇒ 新しい修正目標値の生成とその情報の伝達

Slave Command Governor**の役目**

⇒ データを正しく受信できなかった場合の対処

Outline

1.**概要**
2.MASTER/SLAVE COMMAND GOVERNOR DEVICE
3.BASIC COMMAND GOVERNOR STRATEGY
4.DISTRIBUTED COMMAND GOVERNOR STRATEGY
5.**シミュレーション**
6.**まとめ**

Slave-side system structure

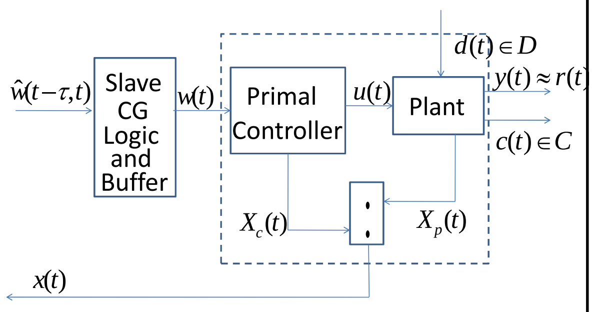


Fig.2

閉ループ系の状態空間表現

$$\begin{cases} x(t+1)=\Phi x(t)+Gw(t)+G_d d(t) \\ y(t)=H_y x(t) \\ c(t)=H_c x(t)+Lw(t)+L_d d(t) \end{cases}$$

$x(t)$:**状態**　$y(t)$:**出力**　$d(t)$:**外乱**　$r(t)$:**目標値**

$c(t)$:**入力、出力など拘束条件のベクトル**

$w(t)$:**時刻tにSlave CGがPlantに入力する修正目標値**

$\hat{w}(t-\tau,t)$:**時刻(t-τ)にMaster側で生成され、時刻tにSlave 側でPlantに入力される修正目標値**

Slave 側の時刻

Master側の時刻

2.MASTER/SLAVE COMMAND GOVERNOR DEVICE

このシステムに対して、外乱がないとした時以下のような仮定をする

1) **このシステムは漸近安定**
2) **このシステムは**offset free,namely $H_y(I_n-\Phi)^{-1}G=I_m$

$$x_e=\Phi x_e+G\bar{r}$$
$$x_e=(I-\Phi)^{-1}\{G\bar{r}\}$$
$$y_e=H_y(I-\Phi)^{-1}G\bar{r}$$
$$\lim_{t\to\infty}y(t)\to\bar{r}\ \Rightarrow H_y(I-\Phi)^{-1}=I_m$$

Master-side system structure

＾のついた変数は遠隔地における変数の予想値となっている

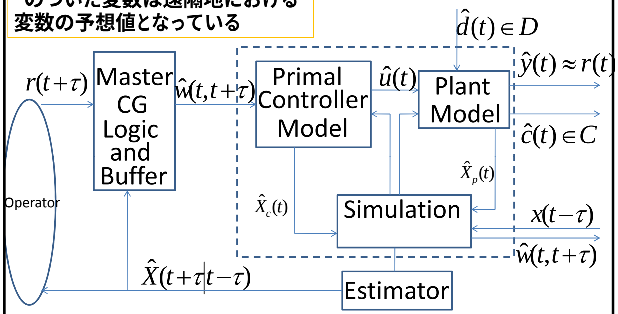


Fig.3

$\hat{X}(t+\tau|t-\tau)$:**時刻$(t-\tau)$のslave側の情報をもとにした時刻$(t+\tau)$におけるslave側の推定状態の存在領域**

2.MASTER/SLAVE COMMAND GOVERNOR DEVICE

$\tau_f(t)$:Master**側から**Slave**側への情報伝達の時間遅れ**

$\tau_b(t)$:Slave**側から**Master **側への情報伝達の時間遅れ**

遅れに上限があると仮定する

$\tau_f(t)\le\bar{\tau}_f$　and　$\tau_b(t)\le\bar{\tau}_b$

これによって2つのcase**に分けて考えることができる**

Normal case : **上式が常に成立するとき**

Abnormal case : **それ以外のとき**

2.MASTER/SLAVE COMMAND GOVERNOR DEVICE

時刻$t_b(t_f)$ **を**master(slave)**が**slave(master)**から最も新しい情報を受け取った時刻とすると**

$t\ge t_b\ge t-\bar{\tau}_b$ $(t\ge t_f\ge t-\bar{\tau}_f)$ **となる**

現在時刻　データ取得時の時刻　Slave側データの送信時刻

Master CG、Slave CG**を以下のような関数と考える**

Master CG:

$$w(t,t+\bar{\tau}_f):=F_1(r(t+\bar{\tau}_f),\hat{X}(t+\bar{\tau}_f|t_b),\hat{w}(t-1,t+\bar{\tau}_f-1))$$

Slave CG:

$$w(t):=F_2(w(t-1),r(t),\hat{w}(t-\bar{\tau}_f,t))$$

目標 F_1,F_2 **の設計**

Outline

1.概要
2.MASTER/SLAVE COMMAND GOVERNOR DEVICE
3.BASIC COMMAND GOVERNOR STRATEGY
4.DISTRIBUTED COMMAND GOVERNOR STRATEGY
5.シミュレーション
6.まとめ

3.BASIC COMMAND GOVERNOR STRATEGY

$$\begin{cases} x(t+1)=\Phi\, x(t)+Gw(t)+G_d d(t) \\ y(t)=H_y x(t) \\ c(t)=H_c\, x(t)+Lw(t)+L_d d(t) \end{cases}$$

線形性により初期状態と入力に依存する部分と外乱の影響による部分に分けることができるので

$\boxed{\begin{array}{l} x(t)=\bar{x}(t)+\tilde{x}(t) \\ \bar{x}(t):\text{初期状態と入力に依存する部分} \\ \tilde{x}(t):\text{外乱の影響に依存する部分} \end{array}}$

$x(t)$ **を上式のように分解する**

$c(t), y(t)$ **も同様に分解する**

3.BASIC COMMAND GOVERNOR STRATEGY

時刻tにおいて拘束を満たすには $c(t)$がどこにあればよいか？

$c(0)=\{\underbrace{\bar{c}(0)}_{\in C_0}+\underbrace{L_d d(0)}_{\in L_d D}\}\in C$

$c(1)=\underbrace{\bar{c}(1)}_{\in C_1}+H_c G_d d(0)+\cancel{L_d d(1)}$

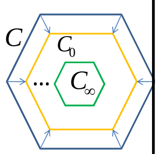
$c(2)=\underbrace{\bar{c}(2)}_{\in C_2}+H_c\Phi G_d d(0)+\cancel{H_c G_d d(1)}+\cancel{L_d d(2)}$

$L_d D$ **で既に除去済み**

$H_c G_d D$**で既に除去済み**

$$\begin{cases} C_0 := C \sim L_d D \\ C_k := C_{k-1} \sim H_c \Phi^{k-1} G_d D \\ C_\infty := \bigcap_{k=0}^{\infty} C_k \end{cases}$$

「~」は集合間の引き算を表す



これによりCにおける外乱の影響を除去した

$\bar{c}(t)$が C_∞ に含まれていれば $^\forall d(t)$ に対して拘束を満たす

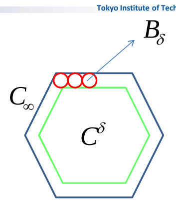
3.BASIC COMMAND GOVERNOR STRATEGY

Consider for a small enough $\delta>0$

$B_\delta=\{c(t)\in\Re^{n_c} \mid \|c(t)\|\le\delta\}$

$C^\delta := C_\infty \sim B_\delta$

$W^\delta := \{w\in\Re^m : \bar{c}_w \in C^\delta\}$



constant command w(t)のときにシステムの解

$\bar{c}_w(t)=H_c\underbrace{(I_n-\Phi)^{-1}Gw}_{\bar{x}_w(t)}+Lw$

B_δ **:半径δのボール**

C^δ **: C_∞ から微小余白をもった集合**

W^δ **:微小余白をもって拘束を満たす修正目標値wの集合**

3.BASIC COMMAND GOVERNOR STRATEGY

Definition: $V(x)$

$V(x)=\{w\in W^\delta : \bar{c}(k,x,w)\in C_k, \forall k\in \mathbf{Z}_+\}$

$\boxed{\begin{array}{l} x(1)=\Phi x(0)+Gw \\ x(2)=\Phi^2 x(0)+\Phi Gw+Gw \\ \vdots \\ x(k)=\Phi^k x(0)+\sum_{i=0}^{k-1}\Phi^{k-i-1}Gw \end{array}}$

$\bar{c}(k,x,w):=H_c\underbrace{(\Phi^k x+\sum_{i=0}^{k-1}\Phi^{k-i-1}Gw)}_{x(k)}+Lw$

状態xに対して全ての時刻kにおいて拘束を満たす修正目標値wの集合

$\Rightarrow V(x)\subset W^\delta$

3.BASIC COMMAND GOVERNOR STRATEGY

The CG output is chosen according to the solution of the following constrained optimization problem

$w(t)=\arg\min_{w\in V(x(t))}\|w-r\|_\Psi^2$

$\|w-r\|_\Psi^2$ を最少にするwを返す

Definition: $\|w\|_\Psi^2 := x^T\Psi x$

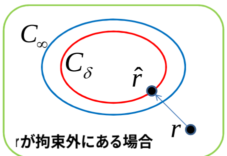
※Ψは重み

システムが漸近安定で $r(t)\equiv r$ のときw(t)は有限時間でrかrの最適近似に収束する

$w(t)\to\hat{r}:=\arg\min_{w\in W^\delta}\|w-r\|_\Psi^2$

結果としてoffset free という条件より

$\lim_{t\to+\infty}\bar{y}(t)=\hat{r}$



Outline

1.概要
2.MASTER/SLAVE COMMAND GOVERNOR DEVICE
3.BASIC COMMAND GOVERNOR STRATEGY
4.DISTRIBUTED COMMAND GOVERNOR STRATEGY
5.シミュレーション
6.まとめ

4.DISTRIBUTED COMMAND GOVERNOR STRATEGY

Definition: $Y(t-1)$ t_b :情報取得時刻

Y(t-1)はMasterで時刻(t-1)まで計算され
時刻 $t_b \sim (t+\bar{\tau}_f-1)$ の間に入力される修正目標値の集合

$$\Rightarrow Y(t-1)=\{w(t_b),\hat{w}(t_b-\bar{\tau}_f+1,t_b+1),\ldots,\hat{w}(t-1,t+\bar{\tau}_f-1)\}$$

$$\hookrightarrow \hat{w}(t_b-\bar{\tau}_f,t_b)$$

Definition: $\Pi(t+\bar{\tau}_f-1|t_b)$

$\Pi(t+\bar{\tau}_f-1|t_b)$ はY(t-1)に含まれる修正目標値で
時刻 $t_b \sim (t+\bar{\tau}_f-1)$ までの修正目標値列を全て集めた集合

example

t_b 以降に情報が受信できなかったとき

$$\Rightarrow \Pi(t+\bar{\tau}_f-1|t_b)\in\{w(t_b),w(t_b),\ldots,w(t_b)\}$$

t_b+1 以降に情報が受信できなかったとき

$$\Rightarrow \Pi(t+\bar{\tau}_f-1|t_b)\in\{w(t_b),\hat{w}(t_b-\bar{\tau}_f+1,t_b+1),\ldots,\hat{w}(t_b-\bar{\tau}_f+1,t_b+1)\}$$

4.DISTRIBUTED COMMAND GOVERNOR STRATEGY

$\Pi(t+\bar{\tau}_f-1|t_b)$ を用いると $\bar{X}(t+\bar{\tau}_f|t_b)$ は以下のように表せる

$$\bar{X}(t+\bar{\tau}_f|t_b):=\bigcup_{w(\cdot)\in\Pi(t+\bar{\tau}_f-1|t_b)}\left(\Phi^{t+\bar{\tau}_f-t_b}x(t_b)+\sum_{i=t_b}^{t+\bar{\tau}_f-1}\Phi^{t+\bar{\tau}_f-i-1}Gw(i)\right)$$

constant command w(t)における $\bar{x},\bar{c}$ は

$$\begin{cases}\bar{x}(k,\bar{X}(t+\bar{\tau}_f|t_b),w):=\Phi^k\bar{X}(t+\bar{\tau}_f|t_b)+\sum_{i=0}^{k-1}\Phi^{k-i-1}Gw\\ \bar{c}(k,\bar{X}(t+\bar{\tau}_f|t_b),w):=H_c\bar{x}(k,\bar{X}(t+\bar{\tau}_f|t_b),w)\Phi^k+Lw\end{cases}$$

$V(x)$ の一般形は

$$V(\bar{X}(t+\bar{\tau}_f|t_b))=\{w\in W^\delta:\bar{c}(k,\bar{X}(t+\bar{\tau}_f|t_b),w)\subset C_k,\forall k\}$$

4.DISTRIBUTED COMMAND GOVERNOR STRATEGY

F_1 の中身は

$$\hat{w}(t,t+\bar{\tau}_f)=\begin{cases}\arg\min_{w\in V(\bar{X}(t+\bar{\tau}_f|t_b))}\left\|w-r(t+\bar{\tau}_f)\right\|_\Phi^2\\ \text{if}\quad V(\bar{X}(t+\bar{\tau}_f|t_b))\ \text{nonempty}\\ \text{Take appropriate actions otherwise}\end{cases}$$

F_2 の中身は

$$w(t)=\begin{cases}\hat{w}(\cdot,t) & \text{If available and } \|\underbrace{\hat{w}(\cdot,t)}_{\text{新しいコマンド}}-r(t)\|_{\Psi_w}^2<\|\underbrace{w(t-1)}_{\text{前回のコマンド}}-r(t)\|_{\Psi_w}^2\\ w(t-1) & \text{otherwise}\end{cases}$$

Outline

1.概要
2.MASTER/SLAVE COMMAND GOVERNOR DEVICE
3.BASIC COMMAND GOVERNOR STRATEGY
4.DISTRIBUTED COMMAND GOVERNOR STRATEGY
5.シミュレーション
6.まとめ

5.シミュレーション

Lowest Data Redundance strategy
時間遅れが有界と仮定したときに用いられる
Merit: 情報が時間どおりに届くと仮定しているので

$$\Rightarrow \begin{cases}\bar{X}(t+\bar{\tau}_f|t_b)=\{x(t+\bar{\tau}_f|t_b)\}\\ \text{計算負荷}\Rightarrow\text{少}\end{cases}$$

Demerit:Abnormal caseの場合、追従性能が悪化

Highest Data Redundance strategy
時間遅れが有界でないと仮定したときに用いられる
Merit:Abnormal caseでも追従性能が劣化しない
Demerit:計算負荷⇒大

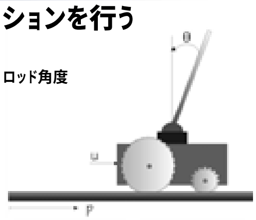
5.シミュレーション

Tokyo Institute of Technology

倒立振子についてシミュレーションを行う

$$\begin{cases} p(t) \in [-0.35, 0.35]m & \text{:位置} \\ \theta(t) \in [-0.08732, 0.08732]rad = [-5,5]^{\circ} & \text{:ロッド角度} \\ u(t) \in [-4.95, 4.95]V & \text{:入力} \end{cases}$$

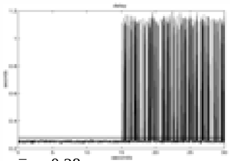
$$x(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p(t) \\ \dot{p}(t) \\ \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{pmatrix}$$



時間遅れは右図のようだとする

Normal case : 0〜15[sec]

Abnormal case : 15〜[sec]



$\overline{\tau}_f = 0.28s$

5.シミュレーション

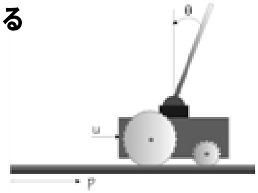
Tokyo Institute of Technology

$x_e = [r, 0, 0, 0]$**で線形化をする**

（rはcartの位置）

Sampling time:20ms

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$



$K_{LQ} = [k_1, k_2, k_3, k_4]$:feedback gain

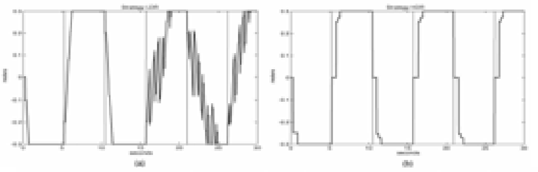
$$u(t) = K_{LQ}[r(t) - p(t), -\dot{p}(t), \theta(t), \dot{\theta}(t)]^T = k_1 r(t) - K_{LQ} x(t)$$

閉ループ系は

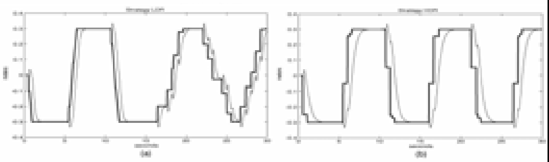
$$\begin{cases} x(t+1) = \underbrace{(A - BK_{LQ})}_{\Phi} x(t) + \underbrace{Bk_1}_{G} r(t) \\ y(t) = \underbrace{C}_{H} x(t) \end{cases}$$

5.シミュレーション

Tokyo Institute of Technology



Master side: (a) LDR, (b) HDR: reference $r(t+\tau_f)$ (thin) and command $w(t, t+\tau_f)$ (thick).



Slave side: (a) LDR, (b) HDR: applied command $w(t)$ (thick) and cart position $p(t)$ (thin).

6.まとめ

Tokyo Institute of Technology

発表内容

●teleoperationの概要

●CGの説明と設計

●シミュレーション

References

Alessandro Casavola,*Member,IEEE*,Edoardo Mosca,*Fellow,IEEE*,and Maurizio Papini
“Predictive Teleoperation of Constrained Dynamic Systems Via Internet-Like Channels”
IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL . 14,NO . 4 ,JULY 2006