

造船工程計画への新アプローチ

最終講義 平成30年3月3日(土) 13:30-15:00


- ・私のバックグラウンド
- ・計画分野の教育研究
- ・制御分野の教育研究
- ・私からのメッセージ
- ・資料(学生論文題目)
- ・資料(PNUでの講義)

九州大学大学院工学研究院
海洋システム工学部門・教授

梶原宏之
(H300303)

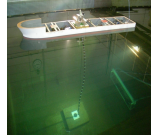
私の年表

7年

1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
九大教授	線形システム制御入門 		高氏DR		木村先生赴任	大坪氏DR

九大箱崎時代

5年

2006	2007	2008	2009	2010
中尾氏DR	五百木氏DR			人位氏DR

九大伊都時代(1)

6年

2011	2012	2013	2014	2015	2016
	ハッサン氏DR	孟氏DR	段氏DR システム制御工学演習 		岩下氏DR

九大伊都時代(2)


1年

2017	2018
九大退職 木村先生寄付講座教授 同(3)	→

制 御	LPV制御 (高)	→	推力配分・リエントリ制御 (大坪・五百木)	→	VIV解析・洋上風車 (孟・段)	→	SMC:SWATH
--------	-----------	---	-----------------------	---	------------------	---	-----------



計 画	DES ロボット	→	Max-Plus法 (中尾・人位)	→	Heap法 (Hassan・岩下)	→	RCPSP法 (造船6社)
--------	----------	---	-------------------	---	-------------------	---	---------------

8年

1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
DPACS開発			岡大講師	岡大助教授	工学博士				制御系CAD	結婚

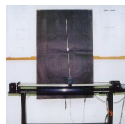
(DPACS) 岡大時代(制御系CAD)

9年

1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
九工大助教授		DELTA実験 			INRIA訪問(LPV制御)	INRIA訪問(ADIP実験)	ONERA-CERT訪問 	

九工大時代(LPV制御)

7年

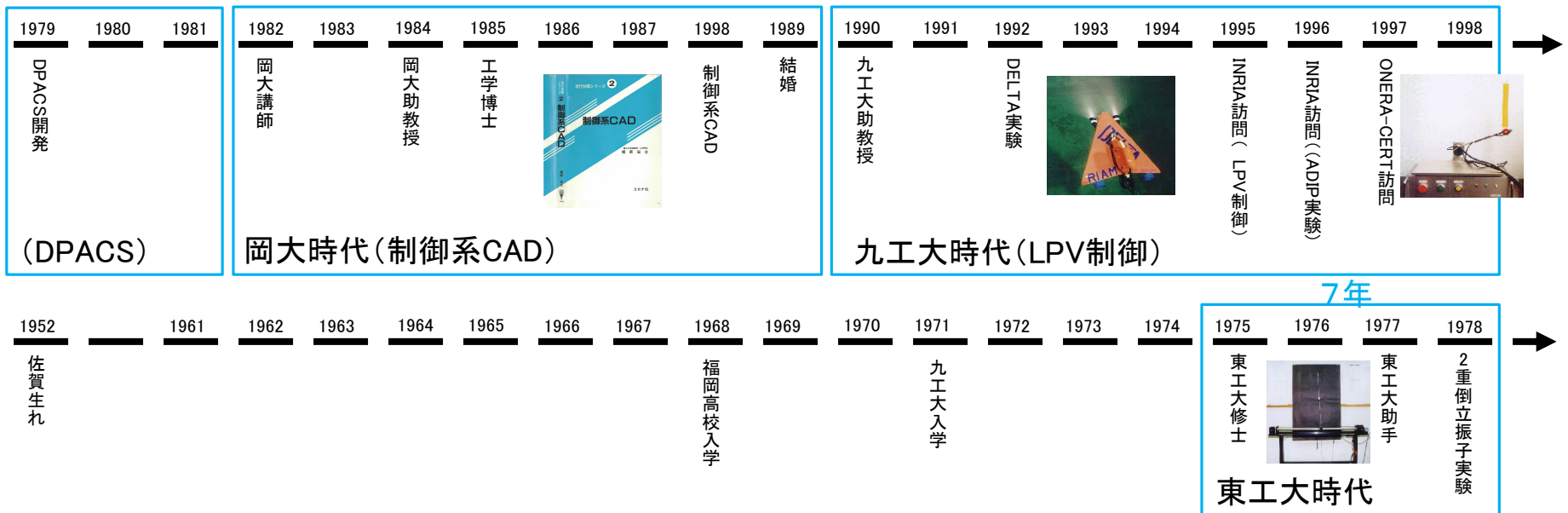
1952	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978
佐賀生れ								福岡高校入学			九工大入学				東工大修士 	東工大助手		2重倒立振り子実験

東工大時代

私の貢献

	制御分野		計画分野
論文	関数オブザーバの構成アルゴリズム	アイデア	造船工程のMax-Plusモデルの提案
論文	多変数系のBode線図の提案(平均ゲインの定義)	論文	造船工程のMax-Plusモデルに基づくPull型計画法
実験	傾斜されたレール上の2重倒立振子の安定化制御	アイデア	造船工程のHeapモデルの提案
ソフト	制御系設計パッケージDPACSの開発	論文	造船工程のHeapモデルに基づくPull型計画法
書籍	「制御系CAD」(単著)	共研	造船工程計画問題のRCPSPとしての定式化
翻訳	「ロバスト制御ツールボックス」	共研	造船工程のRCPSP求解によるPull型計画法
翻訳	「 μ 制御ツールボックス」	共研	RCPSP法の適用(臼杵造船所)
翻訳	「LMIコントロールボックス」	共研	RCPSP法の適用(大島造船所)
実験	アーム駆動型倒立振子のLPV制御実験	共研	RCPSP法の適用(JMU)
セミナー	CDC98 Workshopセミナー	共研	RCPSP法の適用(三井造船)
書籍	「線形システム制御入門」(単著)	共研	RCPSP法の適用(佐世保重工業)
書籍	「システム制御工学演習」(共著)	共研	RCPSP法の適用(今治造船広島工場)
実験	水中ビークルDELTAのLQI/ロバスト制御実験		
実験	ライザー管リエントリ制御系設計法と制御実験		
実験	推力配分方式と制御実験		
実験	SWATHのスライディングモード制御実験		
アイデア	Z試験不要論(単位フィードバック)		
アイデア	剛体振子の制御量(最小位相系)		
アイデア	振り子の制振方式(鋸波上下動による減衰力)		

私のバックグラウンド



私の学び（基幹教育セミナー）

- ① こんな本が一生かかって読めたら
 - 興味を持つ対象を学ぶのに最高の環境に身を置く
- ② 理論は経験の圧縮
 - 同じ時間をかけて同じ経験をする必要がある
 - 研究はディスカッション以外からは生まれはしない
- ③ 壁を叩きながらジャンピング
 - 自分の頭で考えた通りに物が動いたときの感動
 - 研究心が報われたときの感動は人生の喜びの一つ
- ④ 更に学ぶべきは問題解決能力
 - それは博士課程で養成される
 - 優れた専門性を、そして豊かな人間性・社会性を

私の学び（基幹教育セミナー）

■ 電子工学科の学生るとき

- 他学科の科目「自動制御概論」の内容に興味
- 数学(微分積分学)を徹底的に勉強させられていた
- 生協で「一生かかって読めたら」と思う本に出会う
- その著者の研究室に修士課程学生として入学

■ 一流の環境では情報がタイムリーに飛び交う

- 先生どうしは食堂で廊下でタイムリーに情報交換
- どうしてこんなに強運の人たちがいるのだろうか？
- イントロには「What/Why/How」を書けばよい
- 工学とは「身の回りの困っている問題を解くこと」

■ 『線形システムの構造を自分なりに整理したい』

私の学び（基幹教育セミナー）

- ある先生が「理論は経験の圧縮」と板書
 - 理論を理解するにはそれを生み出した人と同じ時間をかけて同じ経験をすることが必要？それは無理！
 - その経験を疑似体験または想像逞しくすることが必要
 - 数学では定理の証明を飛ばすことはできない
- 大学院生るとき
 - 研究室に所属すると例の本が半年で理解できた
 - 修士1年が終わるときには、英文誌に論文投稿
 - 「研究はディスカッション以外からは生まれはしない」という仮説を実証していくことになると思った
- 『気がついたら自分はそこにいた』

私の学び（基幹教育セミナー）

- 自分の頭で考えたアルゴリズムでモノが動いたときの感動が忘れられない
 - 二重倒立振子の安定化制御
 - デンマークから訪ねてきたアンデルセン氏との討論
 - Vivaldiの四季をBGMとして8mmビデオを制作
- 国際学会で論文発表後、皆が振り向いてくれた
 - 多変数系のBode線図の考案
 - 自分は制御理論のフロンティアにいた
 - 数値解析の専門家のセミナーでSVDを知る
- 自分の足場（**専門性**）を確立（I型、 Π 型人間）
- 『人生の価値を研究心におく』

私の学び（基幹教育セミナー）

■ 問題解決能力とは（研究者のサイクル）

1. 問題設定(What/Why)
2. アプローチの考案・選択(How)
3. 一定期間の問題求解、未解決課題の整理
4. 論文執筆・プレゼン

- このサイクルを回せるようになるには博士課程進学要

■ 学びを決めるのはコミュニケーション能力

- 自分の言いたいことを分かりやすく伝える能力
相手が何を言いたいのかを理解する能力
- 困難に直面したとき周囲と対話しながら解決策を探る
- 人生を決めるのは対話力（人間性・社会性）

■ 『米国を見る前にヨーロッパを』

私の学び（PPTの作り方）

■ 【起】：本研究で扱う問題

- どのような問題を，なぜ，どのアプローチで解決するのかを示す。難しいのは「なぜ」の部分：従来研究を示し，本研究の位置付けを示すのが普通

■ 【承】：本研究のアプローチ

- 予備知識や問題解決への具体的アプローチを示す

■ 【転】：本研究の成果

- 問題を解決していく過程を示す

■ 【結】：本研究のまとめと課題

- どのような結果が得られたか，そしてどのような未解決の課題が残されたかを示す

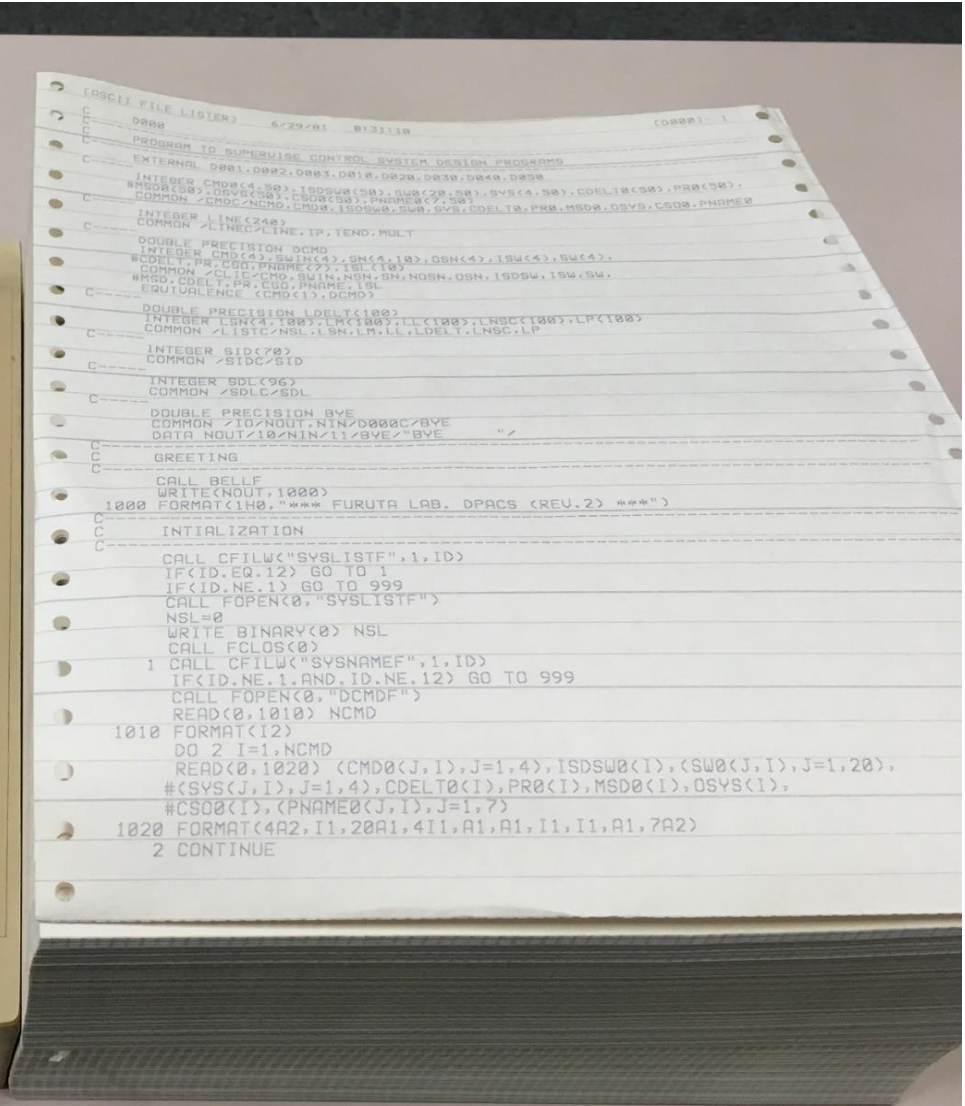
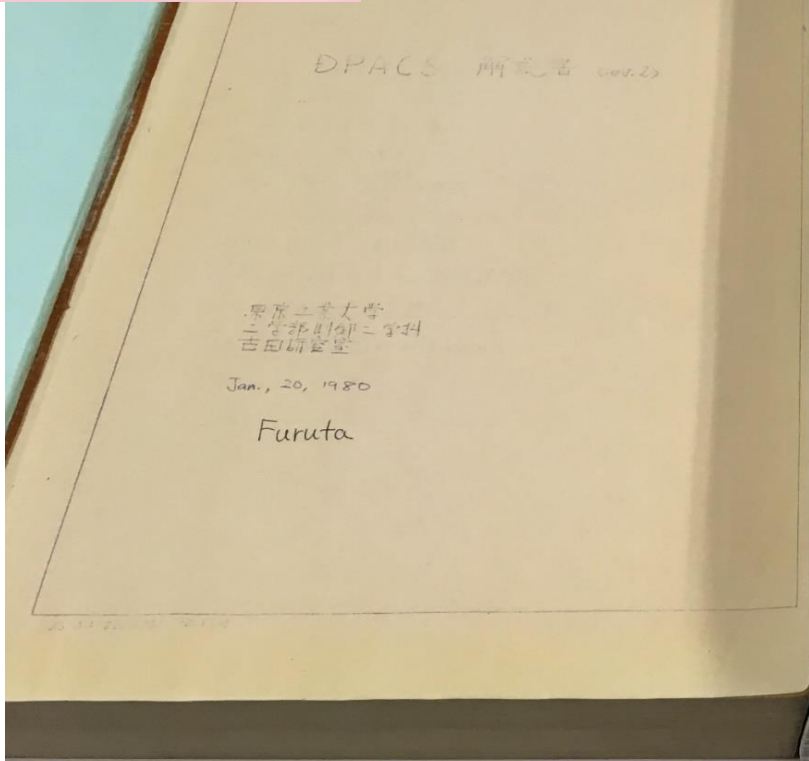
恩師古田勝久先生の著書など



東工大の研究室にて



DPACS

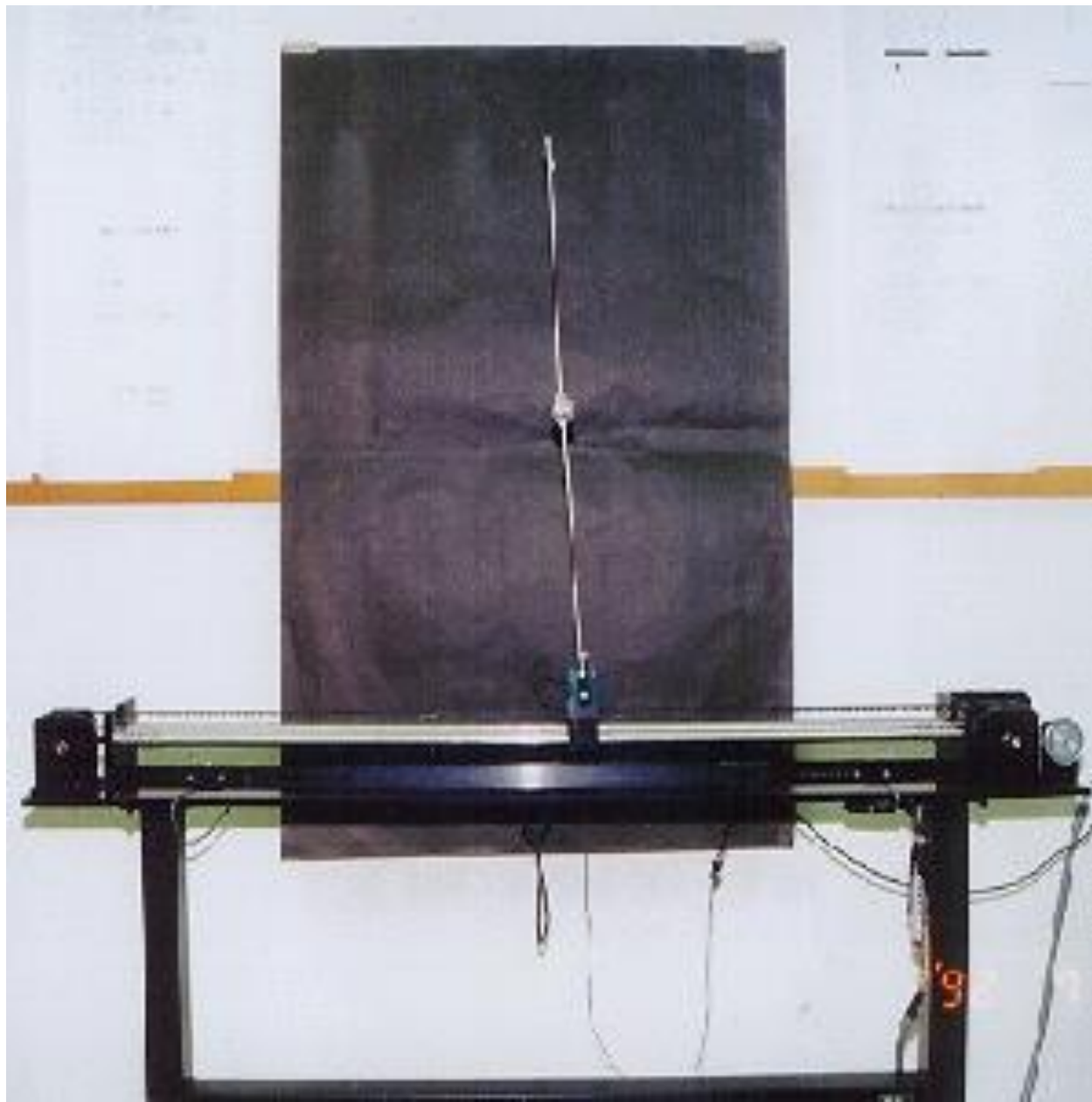


2重倒立振り子



FUJICOLOR 81

2重倒立振子



私の修士論文

Canonical Realization of Observers
for Linear Functions of the State

by

Hiroyuki Kajiwara

A thesis submitted to Department of Systems Science, Tokyo Institute
of Technology in partial fulfillment for the requirement for the degree
of Master of Engineering

February, 1977

INT. J. CONTROL, 1979, VOL. 29, NO. 3, 457-469

Canonical realization of observers with arbitrarily assigned poles for linear functions of the state

HIROYUKI KAJIWARA† and KATSUHISA FURUTA‡

This paper shows that an observer $\Sigma_{ob}(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}, \hat{J})$ for a linear function Kx of the state of a time-invariant linear system $\Sigma(A, B, C)$ is characterized by a new system $\Sigma_{OB}(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D})$ with the initial state \hat{J} which receives Markov parameters $\{CA^iB\}_{i=0, \dots, r+\mu-1}$ as the input and gives $\{KA^iB\}_{i=0, \dots, r+\mu-1}$ as the output, where r is the controllability index of (A, B) and μ is the observability index of (A, C) . It admits that the observer is constructed by a realization of $\Sigma_{OB}(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D})$ from the input-output data and a determination of the initial state \hat{J} . An algorithm is presented to construct the lower order observer with arbitrarily assigned poles in a canonical form.

1. Introduction

We shall be concerned with an observer which estimates a linear function of the state of a time-invariant linear system. The theory of the observer is developed from the fundamental lemmas proved by Fortmann and Williamson (1972; lemma 1 and lemma 2). It is known that for the n th order system with p independent outputs, the state observer of the minimal order $n-p$ can be constructed and the poles can be arbitrarily assigned if the given system is observable (Gopinath 1971).

The observer for a linear function of the state may have the desirable property that the order is less than that of the state observer. Indeed Luenberger (1966) has shown that any linear functional of the state could be estimated by the observer of the order $\eta-1$ with arbitrarily assigned poles, where η is the observability index of the given system. Murdoch (1973) has given the algorithm constructing the observer of the order $\eta-1$ for a linear functional of the state. However for some linear functional, the observer of the order less than $\eta-1$ can be constructed and the poles can be arbitrarily assigned. Based on this fact there is a strong motivation to establish the algorithm which constructs the observer for the given linear function of the state such that it has arbitrarily assigned poles and the order is as small as possible. Roman and Bullock (1975) have comprehensively discussed the problem via the minimal stable partial realization theory.

The purpose of this paper is to give a useful characterization for the observer and an algorithm to construct it. In § 2, it is shown that the observer $\Sigma_{ob}(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}, \hat{J})$ for a linear function of the state of the given system $\Sigma(A, B, C)$ is characterized by a new system $\Sigma_{OB}(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D})$ with the initial state \hat{J} which receives Markov parameters $\{CA^iB\}_{i=0, \dots, r+\mu-1}$ as the input and gives $\{KA^iB\}_{i=0, \dots, r+\mu-1}$ as the output, where r is the controllability index of

Received 23 November 1976.

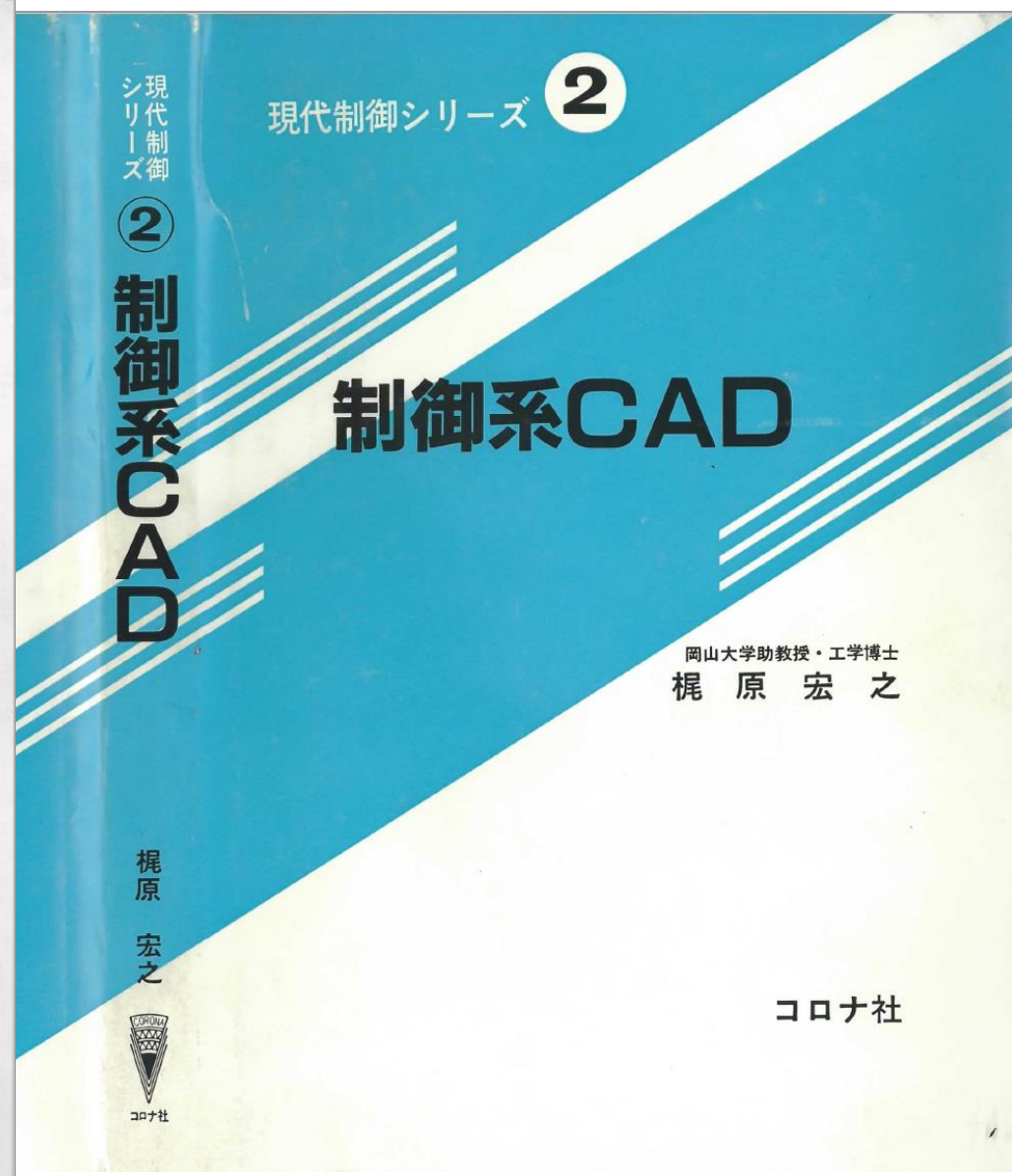
† Department of Systems Science, Tokyo Institute of Technology, Oh-okayama, Meguro-ku, Tokyo, Japan.

‡ Department of Control Engineering, Tokyo Institute of Technology, Oh-okayama, Meguro-ku, Tokyo, Japan.

私の博士論文と著作：制御系CAD

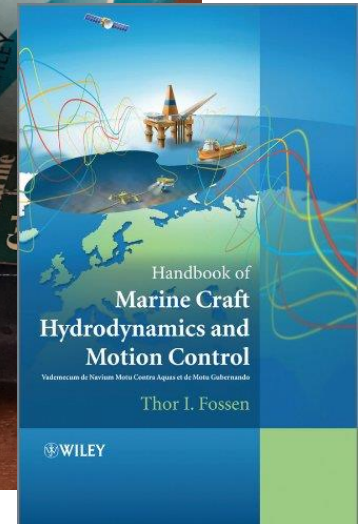
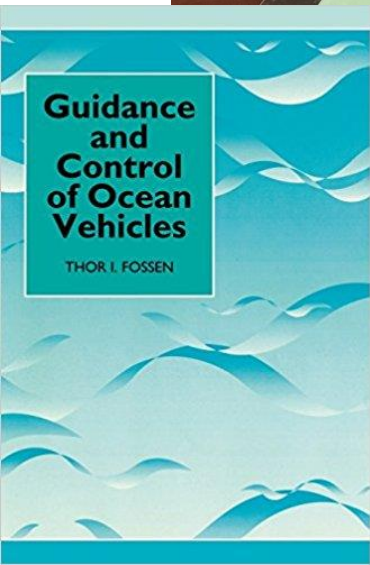
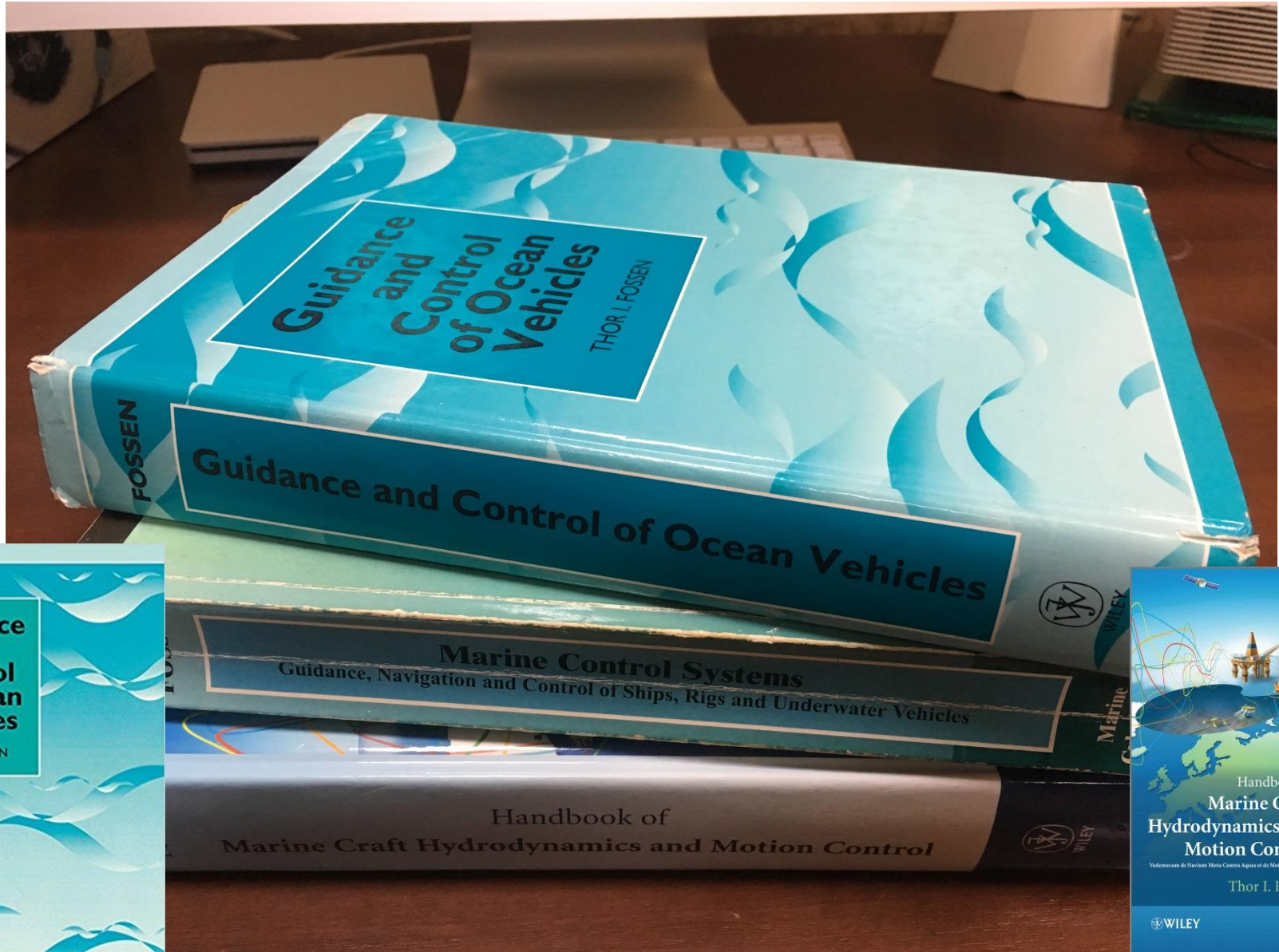
線形多変数制御系の計算機援用設計に関する研究

梶原宏之



コロナ社

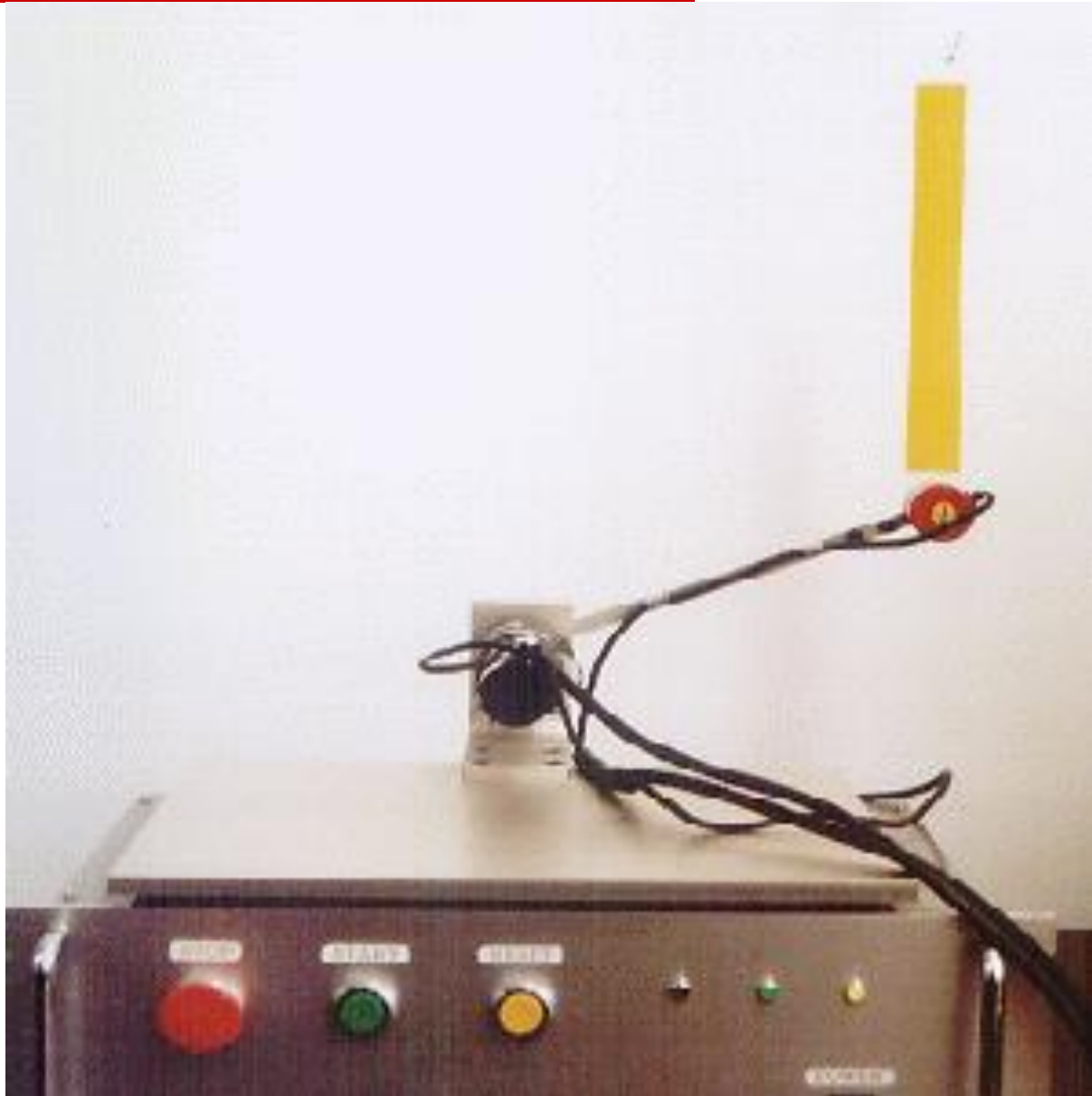
Fossenの本



DELTA



LPV制御



CDCワークショップ資料

LMI Techniques in Control Engineering

from Theory to Practice

Workshop Notes CDC 1996, Kobe, JAPAN

Pierre Apkarian
Greg Becker
Pascal Gahinet
Hiro Kajiwara

December 9-10, 1996

LPV Techniques for Control of an Inverted Pendulum

Hiroyuki Kajiwara, Pierre Apkarian, and Pascal Gahinet

Gain-scheduling control structures have proved useful in many practical applications. As an example, most aircraft control laws are based on the interpolation of individually designed controllers or make use of some ad-hoc gain-switching policy. Similarly, in robot control problems the controller dynamics are adjusted in real-time according to geometry and inertias. However, in spite of numerous successful applications, the construction of the overall control structure invariably calls for the engineering insights of the designer and, more critically, the resulting control laws do not provide any guarantees in the face of rapid changes in the scheduled variables. These difficulties have been the main motivation for the development of modern gain-scheduling control techniques, and have led to some challenging research in the area of the analysis and synthesis of LPV systems. Such systems are described in state-space form as

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A(\theta)x + B(\theta)u, \\ y &= C(\theta)x + D(\theta)u,\end{aligned}\quad (1)$$

where $\theta = \theta(t)$ is a time-varying parameter describing the range of possible dynamics of the plant. Such systems are natural extensions of customary LTI systems.

Briefly speaking, the recently available LPV synthesis techniques allow the construction of the global control law as a whole entity for all admissible θ , that is, without requiring unnatural separated design syntheses. They furthermore provide theoretical guarantees in terms of both stability and performance in the presence of fast time-domain evolutions of the scheduled variables. Note also that these synthesis techniques reduce to solving a finite set of LMIs (Linear Matrix Inequality), which are easily solved using currently available LMI codes.

In this work, we are considering the challenging application of an arm-driven inverted pendulum (ADIP) as depicted in Fig. 1. The ADIP was originally designed by Dr. Y. Nishi for training purposes at Kawasaki Heavy Industry in Japan. Here the pendulum is the top link and is driven by the rotated arm (bottom link), instead of a more classical cart. As the arm is rotated and gets closer to the horizontal position, the horizontal motion of the arm tip becomes more limited and the inertias viewed from the arm are modified. This naturally leads to the design of controllers that adjust in real-time to the rotation of the arm. For this purpose, two kinds of LPV synthesis techniques are investigated:

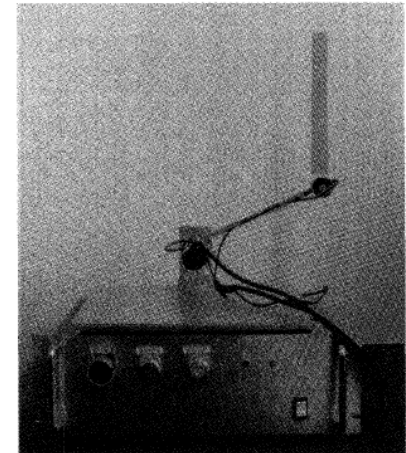


Fig. 1. Arm-driven inverted pendulum (ADIP).

- the so-called LFT (Linear Fractional Transformation) control techniques, which are well suited when the model state-space coefficients are fractional functions of a varying parameter (possibly a state), and
- polytopic techniques, which assume that the state-space coefficients evolve in a prescribed (bounded) polytope (as for instance a hypercube).

The intention behind these different representations is to account for the time-varying and nonlinear nature of the plant by formalizing a set of admissible trajectories instead of a single operating point.

Our aim is to completely validate these techniques on the physical experiment. Therefore, in addition to the usual stability, performance, and robustness requirements, we shall also be concerned by the implementation constraints that inevitably show up in real-world applications. The major implementation constraints are the following.

- The high-frequency gain of the controllers must be compatible with the actuator bandwidth.
- The controller dynamics must be consistent with the available sampling rate in this application (≤ 1 kHz).

Hiroyuki Kajiwara (kajiwara@ces.kyutech.ac.jp) is with the Kyushu Institute of Technology, Kawazu, Japan. Pierre Apkarian is with ONERA-CERT, Toulouse, France. Pascal Gahinet is with The MathWorks, Inc., Natick, MA.

LMIソルバー

- 問題設定

$$\text{Minimize } f(X_1, \dots, X_n)$$

$$\text{subject to } \begin{cases} G_i(X_1, \dots, X_n) = 0 & (i = 1, \dots, p) \\ H_j(X_1, \dots, X_n) \geq 0 & (j = 1, \dots, q) \end{cases}$$

- 決定変数 $X = [X_1 \ \dots \ X_n]^T$

- 目的関数（1次関数） OBJ

$$f(X_1, \dots, X_n) = c^T X = c_1 X_1 + \dots + c_n X_n$$

- 等式制約（線形行列方程式） LME

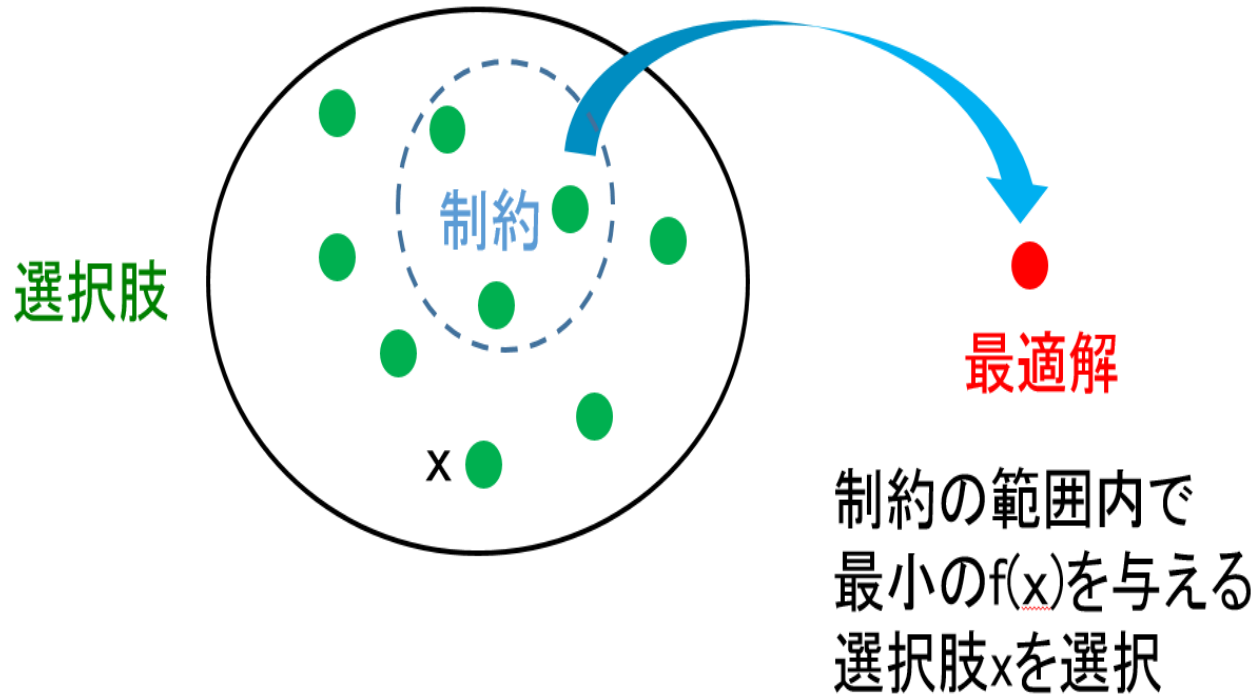
$$G(X_1, \dots, X_n) = X - X^T$$

- 不等式制約（線形行列不等式） LMI

$$\begin{cases} H_1(X_1, \dots, X_n) = X \\ H_2(X_1, \dots, X_n) = -XA - A^T X \end{cases}$$

最適化の問題設定

目的関数を最小化(最大化)するように、制約条件を満足するものから選択



最適化問題

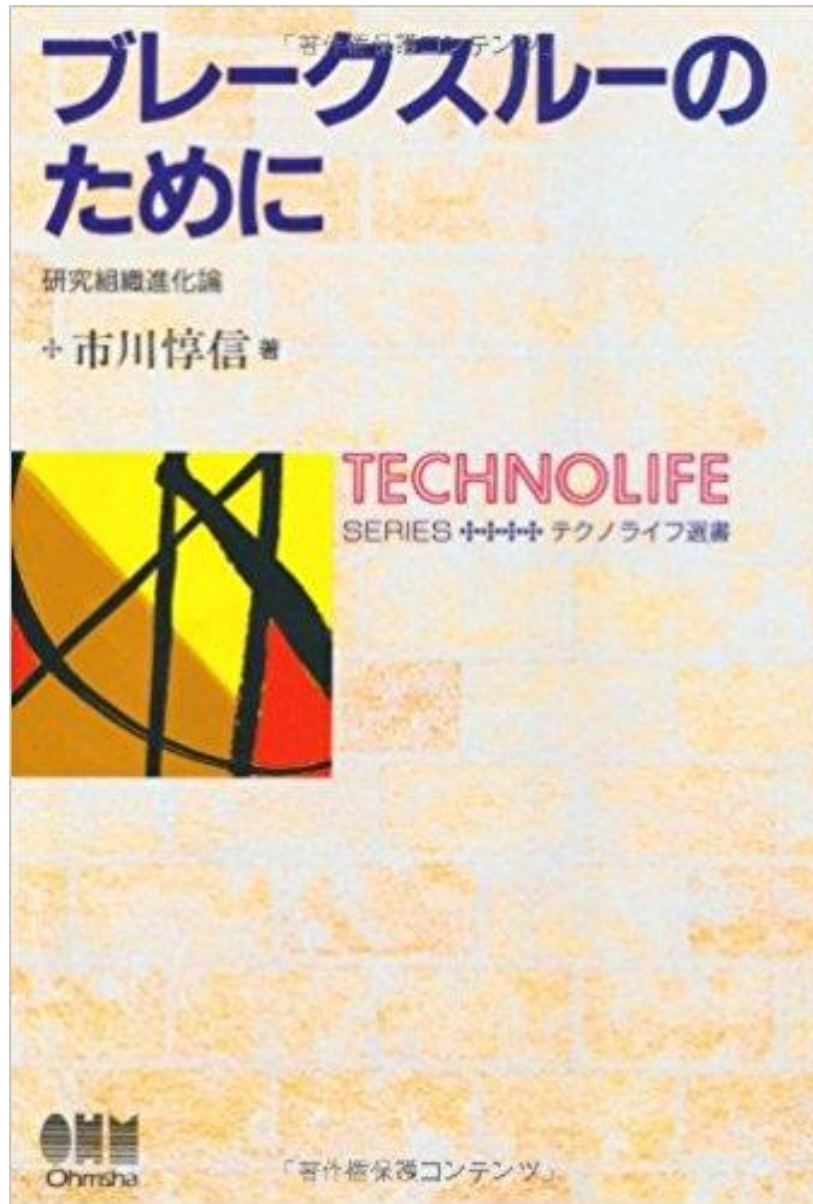
$$\text{Min}_x f(x)$$

ただし

- 制約条件 #1
- 制約条件 #2

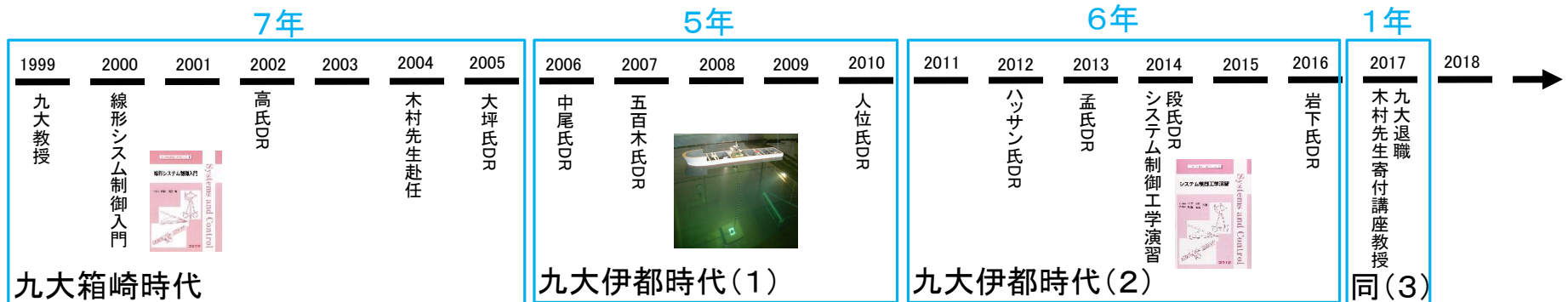
:

市川惇信先生



学士・修士・博士
課程の必十条件

計画分野の教育研究



野本敏治先生、青山和浩先生

私のエンジニアリング・ノートブック
—溶接から造船、そしてシステムへ—

野本 敏治

東京大学大学院 工学系研究科
環境海洋工学専攻

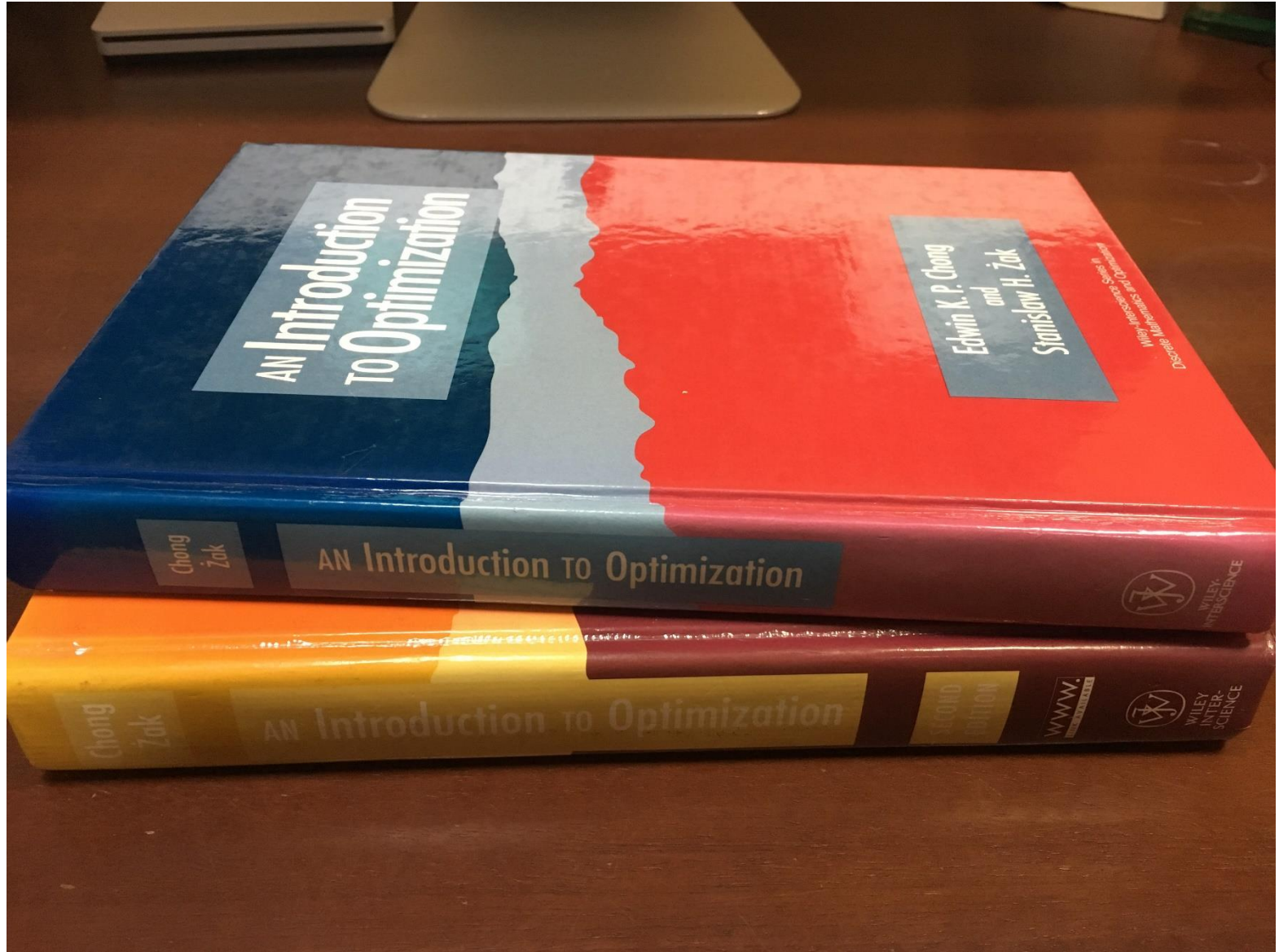
大規模システム

システム工学

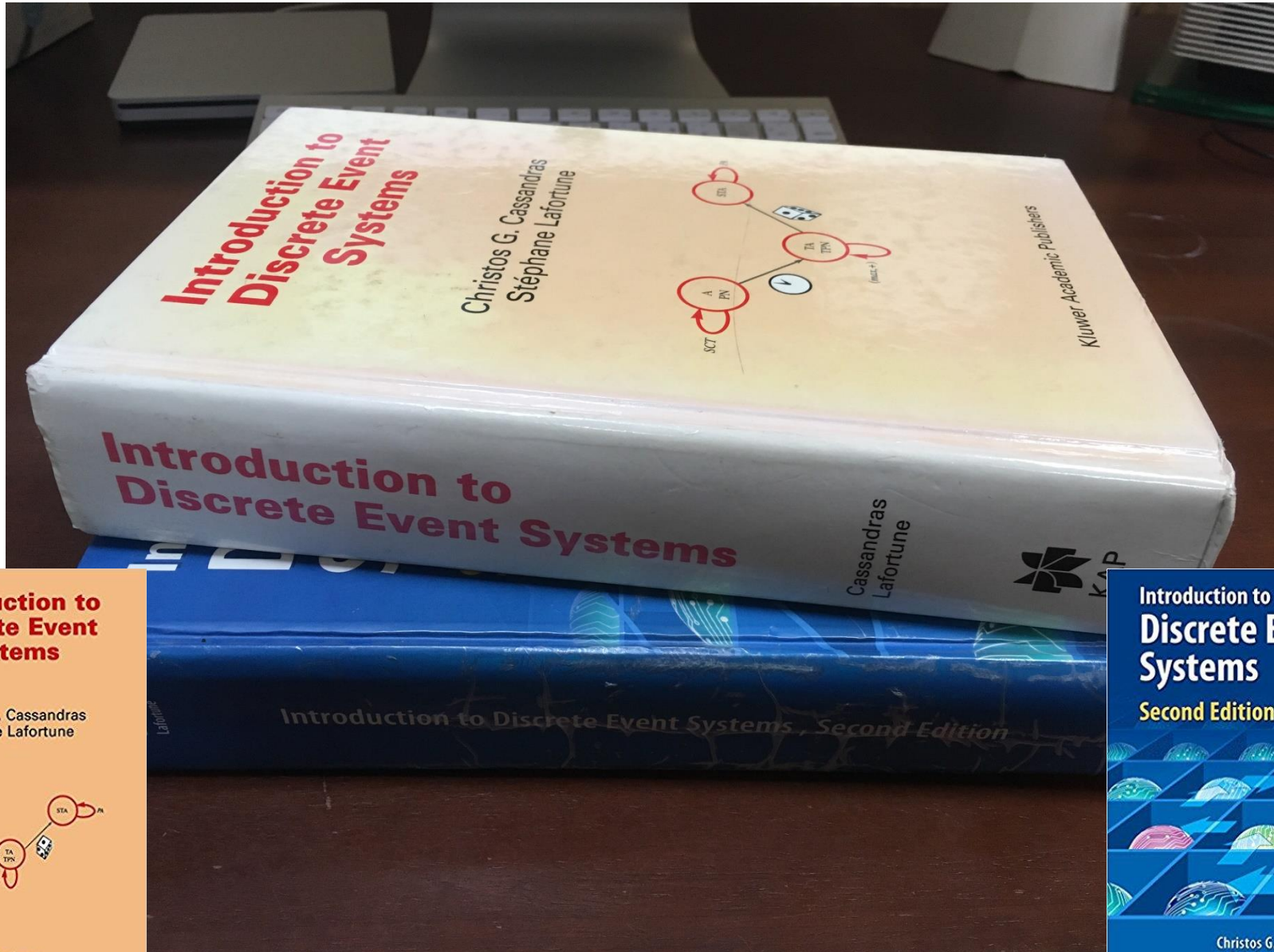


物事を調整し
仕上げていくこと

関数最適化

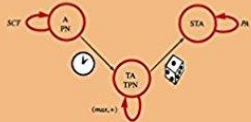


DES本



Introduction to Discrete Event Systems

Christos G. Cassandras
Stéphane Lafortune



Springer

Introduction to Discrete Event Systems

Second Edition

Christos G. Cassandras
Stéphane Lafortune

造船工程はどのシステムか？

46 | Chapter 1 Systems and Models

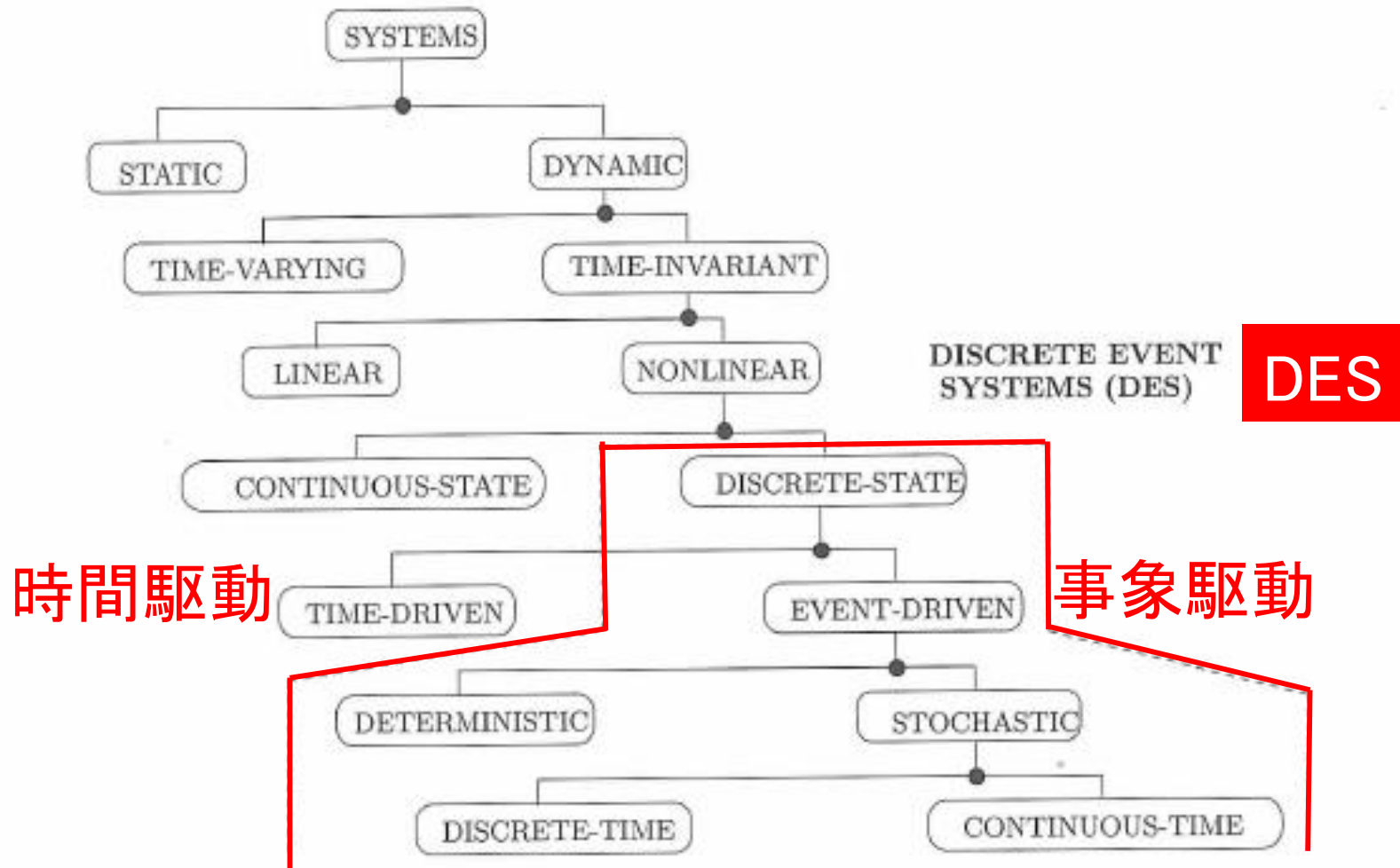
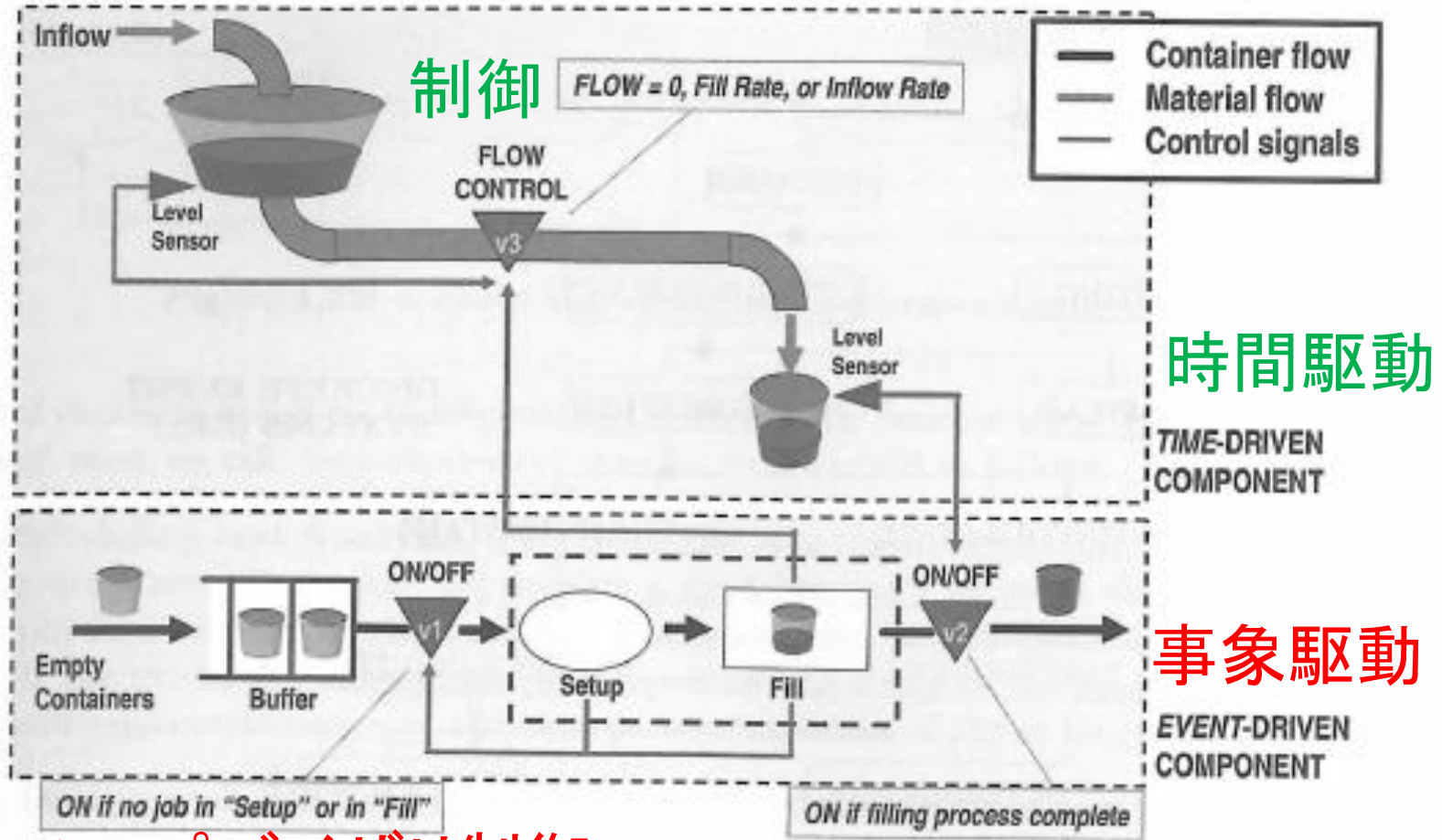


Figure 1.31: Major system classifications.

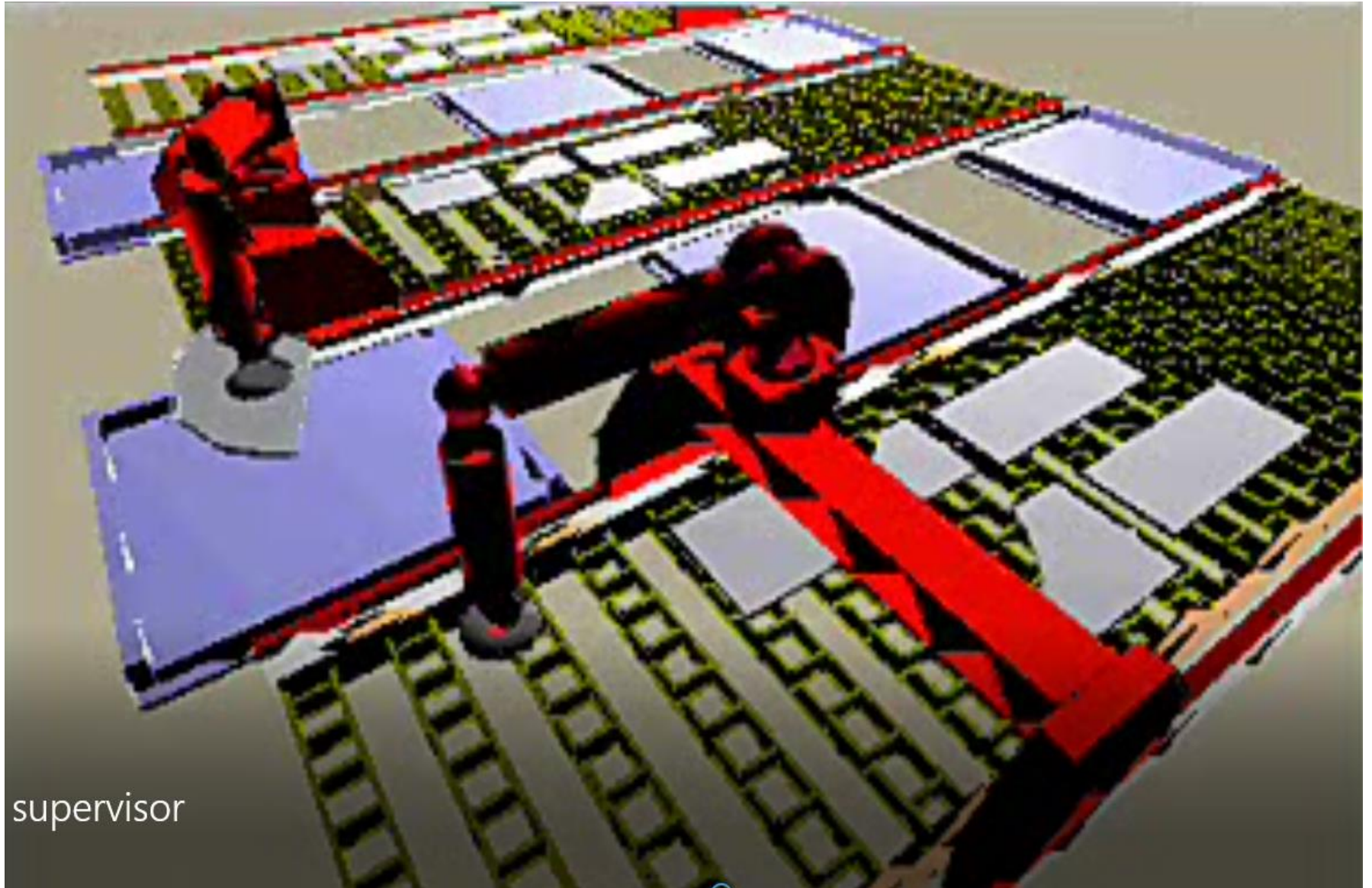
事象駆動



スーパバイザリ制御

Figure 1.30: A hybrid system example.

部材仕分けロボット

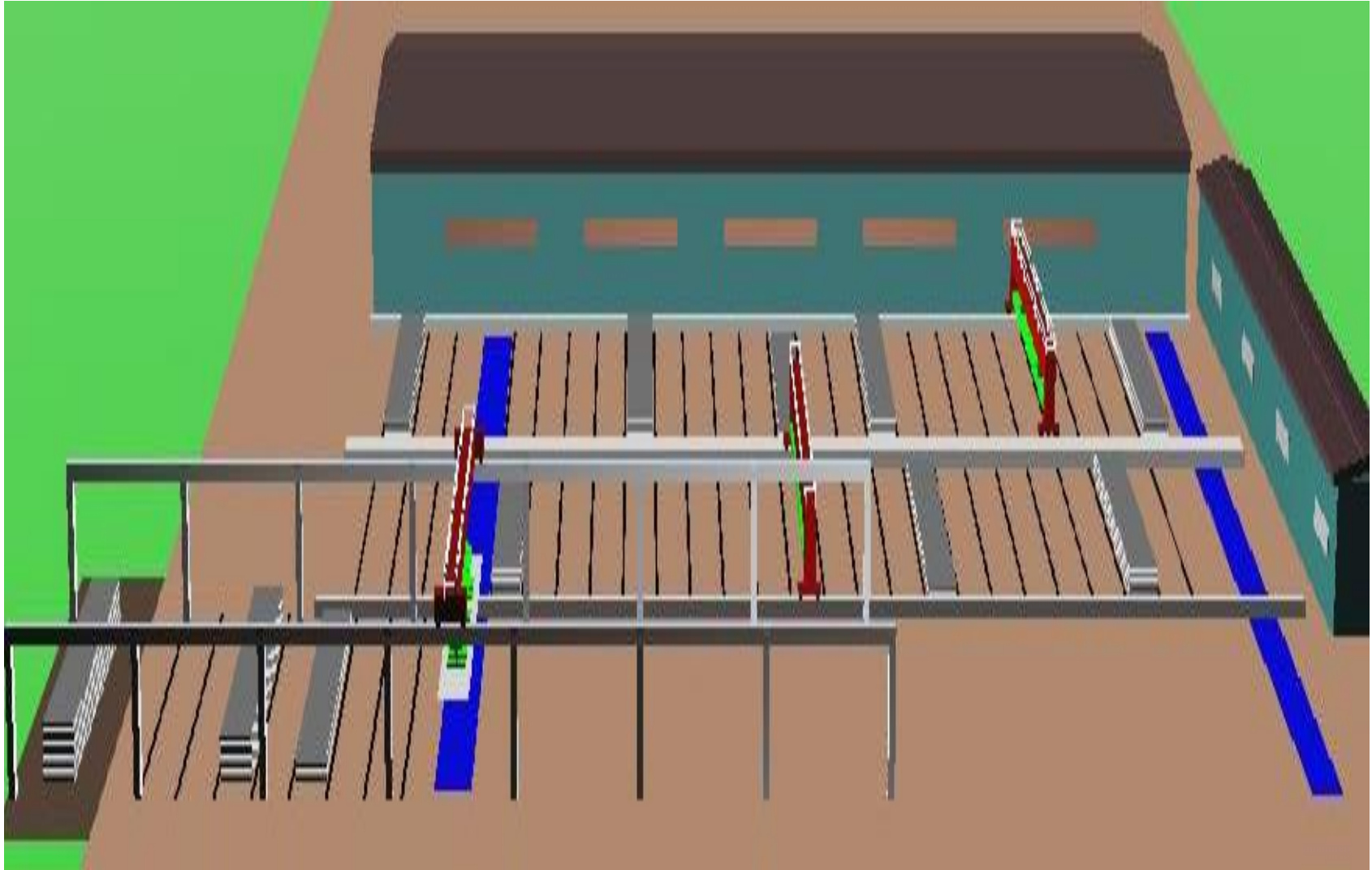


supervisor

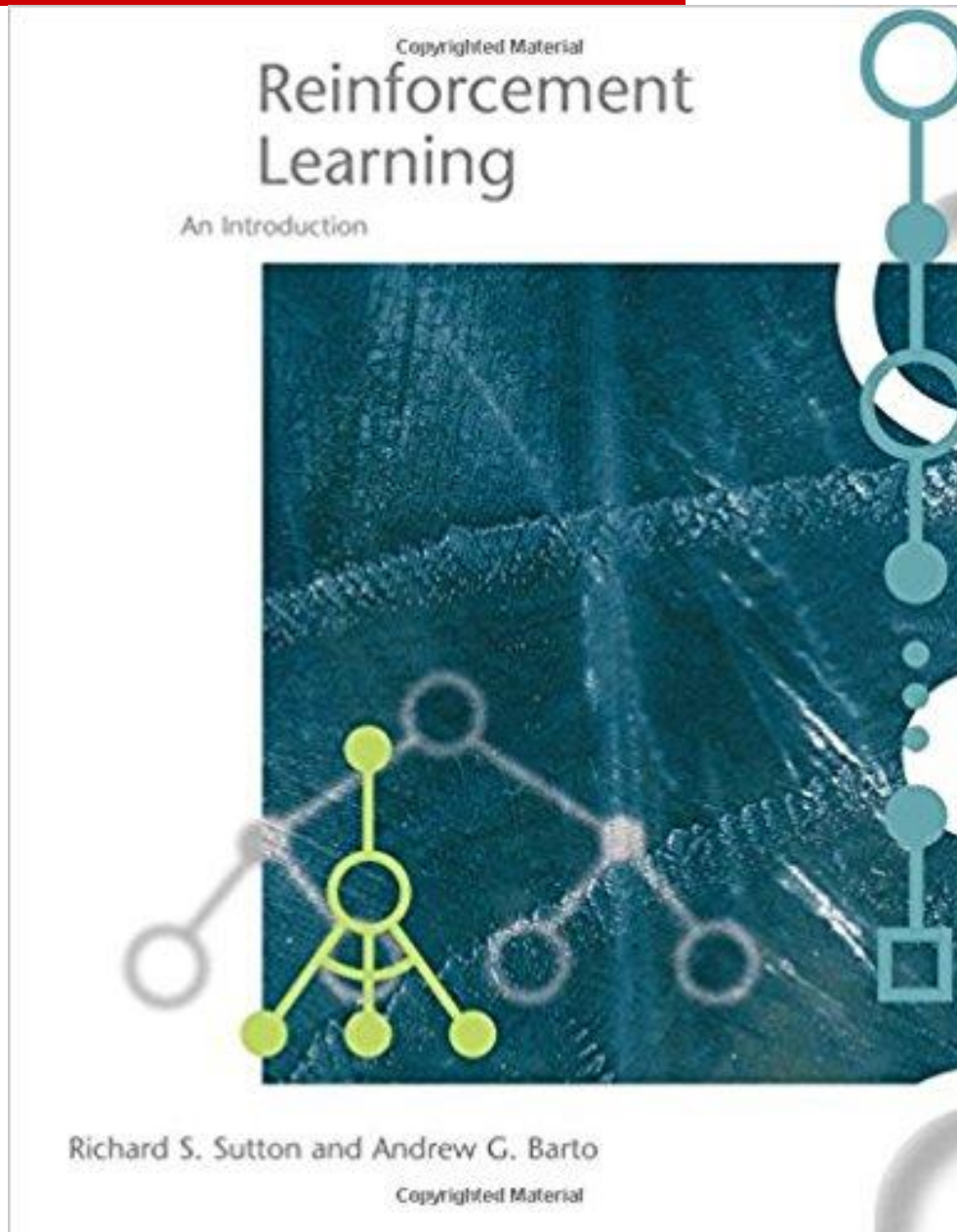
6足ロボット



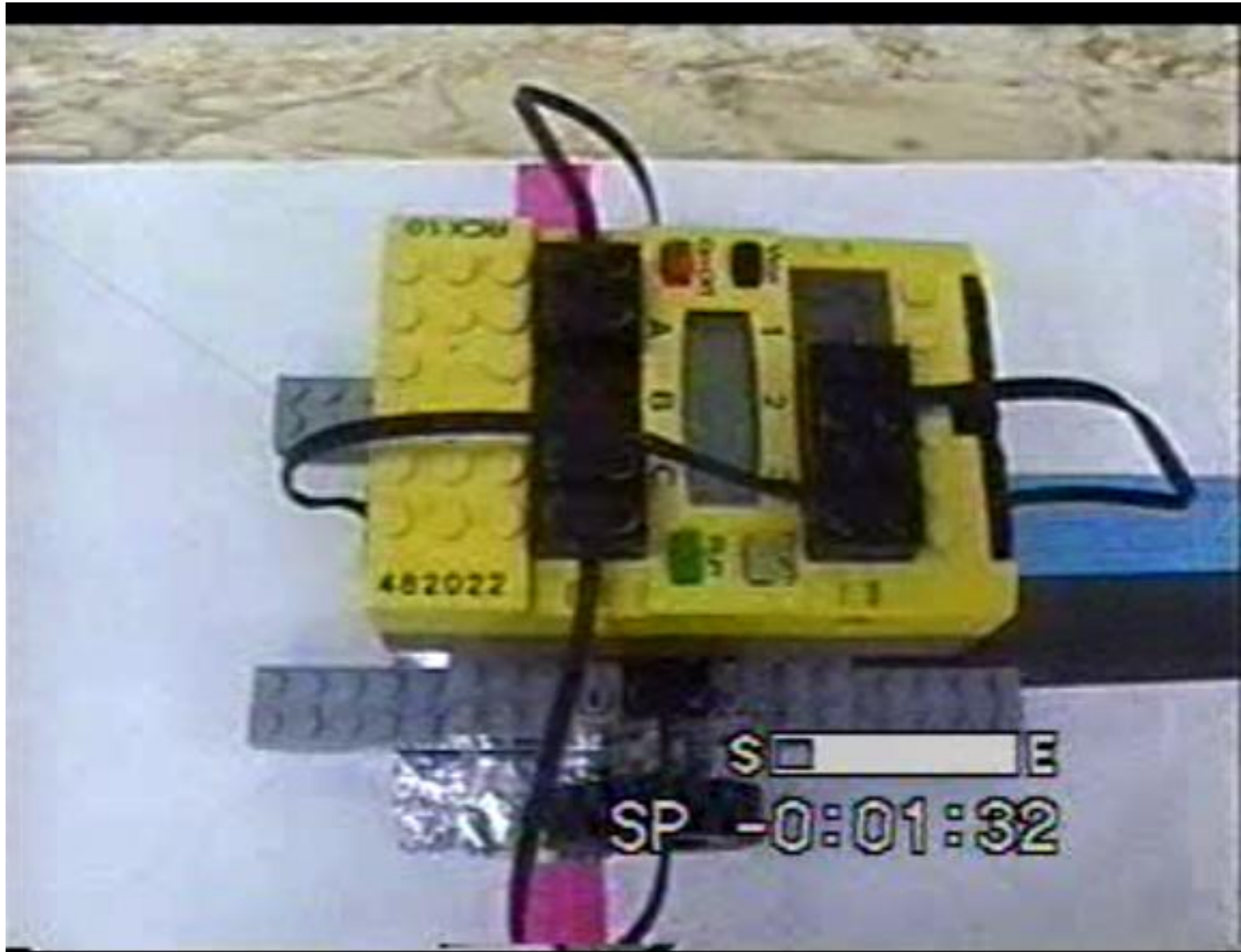
鋼板水切り場



強化学習



強化学習



アオサ回収

環境ロボティクス



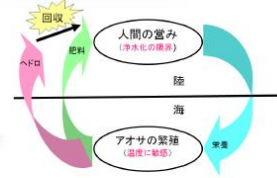
和白干潟(2004/9/20)



アオサの大量発生箇所



アオサ回収の意義

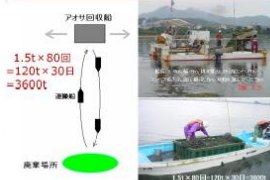


様々な回収方法

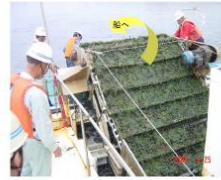
- 干潟上での回収(干潟を痛めたり、砂が混入)
 - 熊手、地引網、ポンプ、フルドーザなど
- 海上からの回収(きわめて効率的)
 - 専用回収船



博多湾環境整備によるアオサ回収



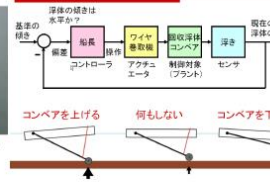
コンベアから回収船へ



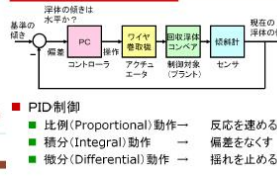
船長さんの操作の様子



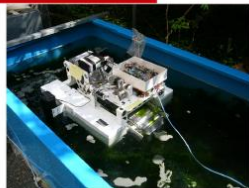
船長さんの操作



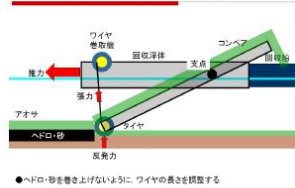
フィードバック制御(自動化)



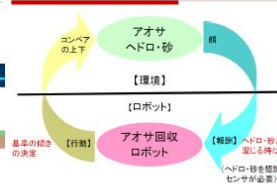
アオサ回収ロボットの製作



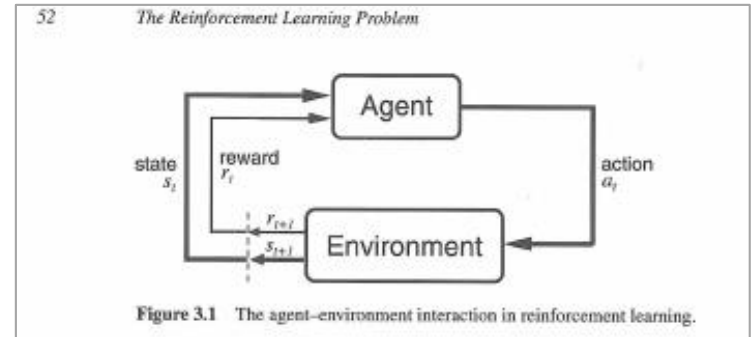
ヘドロや砂への対応(知能化)



ロボットの強化学習



RL:非構造化環境



DES:構造化環境

システム計画学研究室

船舶海洋分野における システム計画学の確立



【システム計画学研究室】

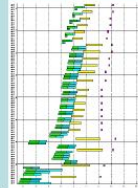
当研究室は、船舶海洋分野における様々なシステム計画案のフィージビリティスタディを通して、有用な方法論をシステム計画学として確立することを目的としています。システム計画の決め手となる要素技術として、システム制御技術、特に制御技術と最適化技術を重視しています。

【船舶分野】

造船初期計画用 プラットフォームの開発

デジタル造船所の開発

所定のドック工程の開始日に間に合うようにブロック組立工程の開始日を設定する問題に対して、ブロック組立工程をMax-Plus代数に基づく線形システムとしてモデル化し、モデル予測制御という手法を適用し、その有用性を実証しようとしています。

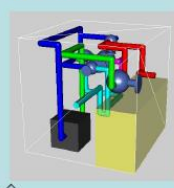


Max-Plus代数

- 離散事象ダイナミクスの線形システム表現
- モデル予測制御による生産スケジューリング

配管・機器配置の最適設計

配管設計はバルブ操作性やパイプの保守性など考慮すべき事柄が多く、また漠然とした評価であるため熟練設計者頼みです。そこでこの評価を数値化し、多目的最適化問題へ帰着して遺伝的手法を適用することで設計の自動化を目指しています。



多目的最適化

- 熟練設計者の経験的評価基準の数値化
- 遺伝的アルゴリズムNSGA2の適用

【海洋分野】

温暖化阻止に係わる 環境対話型ロボットの提案

付加物をもつ浮体の運動制御

深海底掘削のためにはライザー管とよばれる長大な柔軟構造物が使われますが、これがスピルオーバー不安定を引き起こさないようにリエントリ制御を行う問題に対して、LPV制御技術を適用し、その有用性を実証しようとしています。これは応用力学研究所との共同研究です。

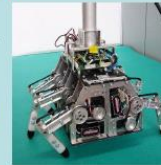


LPV制御

- 速度変化による動特性変動のLPVモデリング
- LPV制御系の設計および実装技術

水中作業ロボットにおける運動制御規則の自動獲得

多足ロボットや多関節水中マニピュレータを製作し、不確実な環境における最適経路のプランニングや、作業達成に必要な動作をロボット自身が試行錯誤を通じて獲得する方法の確立を目指しています。



強化学習

- 試行錯誤を通じた動作規則の自動獲得技術
- 多関節・冗長自由度ロボットの制御技術

計画のバイブル



計画者は自信もって
現場に指示を出すべき

Max-Plus代数

5.4 DIOID ALGEBRAS

Another modeling framework we will briefly describe in what follows is based on developing an algebra using two operations: $\min\{a, b\}$ (or $\max\{a, b\}$) for any real numbers a and b , and addition $(a + b)$. The motivation comes from the observation that the operations “min” and “+” are the only ones required to develop the timed automaton model summarized in Fig. 5.4. Similarly, the operations “max” and “+” are the only ones used in developing the timed Petri net models described in the previous section in the case of marked graphs.

The term “dioid” (meaning “two”) refers to the fact that this algebra is based on two operations. The operations are formally named *addition* and *multiplication* and denoted by \oplus and \otimes respectively. However, their actual meaning (in terms of regular algebra) is different. For any two real numbers a and b , we define

$$\text{Addition : } a \oplus b \equiv \max\{a, b\} \quad (5.45)$$

$$\text{Multiplication : } a \otimes b \equiv a + b \quad (5.46)$$

This is admittedly somewhat confusing, since \otimes really means $+$, and \oplus really means \max . This dioid algebra is also called a $(\max, +)$ algebra.

Remark. The $(\max, +)$ algebra could easily be replaced by a $(\min, -)$ algebra. This is simply because

$$\max\{a, b\} = -\min\{-a, -b\}$$

and

$$a + b = a - (-b)$$

As already mentioned, the motivation for introducing this algebra may be found directly in the model (5.7) through (5.12) which we derived for timed automata. But the motivation goes even further. If we consider a standard linear discrete-time CVDS, its state equation is of the form

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k)$$

which involves (regular) multiplication (\times) and addition ($+$). A question one can raise, therefore, is the following: Can we use a $(\max, +)$ algebra with DES, replacing the $(+, \times)$ algebra of CVDS, in order to come up with a representation similar to the one above? Moreover, can we parallel the analysis of linear CVDS using the $(\max, +)$ algebra in DES? To a considerable extent, the answer to these questions is “yes.”

The study of dioid algebras (sometimes also called min-max algebras) has appeared in the literature since the 1970s. Their use in the modeling and analysis of timed DES, however, was pioneered by Cohen et al. in the mid-1980s. We shall limit ourselves here to a brief description of how the $(\max, +)$ algebra can be used to analyze a simple timed DES (a simple queuing system). We will therefore be able to get the main ideas across, as well as identify the key advantages and limitations of this modeling framework.

5.4.1 Basic Properties of the $(\max, +)$ Algebra

Using the definitions of \oplus and \otimes in (5.45) and (5.46), we can verify the following properties.

Commutativity of \oplus, \otimes :

$$\begin{aligned} a \oplus b &= \max\{a, b\} = \max\{b, a\} = b \oplus a \\ a \otimes b &= (a + b) = (b + a) = b \otimes a \end{aligned}$$

Associativity of \oplus, \otimes :

$$\begin{aligned} (a \oplus b) \oplus c &= \max\{\max\{a, b\}, c\} = \max\{a, \max\{b, c\}\} = a \oplus (b \oplus c) \\ (a \otimes b) \otimes c &= (a + b) + c = a + (b + c) = a \otimes (b \otimes c) \end{aligned}$$

Distributivity of \otimes over \oplus :

$$\begin{aligned} (a \oplus b) \otimes c &= \max\{a, b\} + c = \max\{(a + c), (b + c)\} \\ &= (a \otimes c) \oplus (b \otimes c) \end{aligned}$$

Null element in \oplus :

$$a \oplus \eta = \max\{a, \eta\} = a \quad \text{for any } a \in \mathbb{R} \text{ and some } \eta \in \mathbb{R}$$

In particular, we can select $\eta = -\infty$, since $\max\{a, -\infty\} = a$ for any $a \in \mathbb{R}$. Alternatively, if we are only dealing with a subset of \mathbb{R} , say A , we can select any negative real number $-L$ that satisfies $-L < a$ for any $a \in A$.

Absorbing null element in \otimes :

$$a \otimes \eta = a + (-\infty) = \eta$$

Idempotency in \oplus :

$$a \oplus a = \max\{a, a\} = a$$

Example 5.5

This is an example of matrix multiplication in the $(\max, +)$ algebra:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 2 & -2 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \max(1+2, 0+3) & \max(1-1, 0+1) \\ \max(2+2, -2+3) & \max(2-1, -2+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 4 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Suppose we now multiply the resulting matrix with a scalar a :

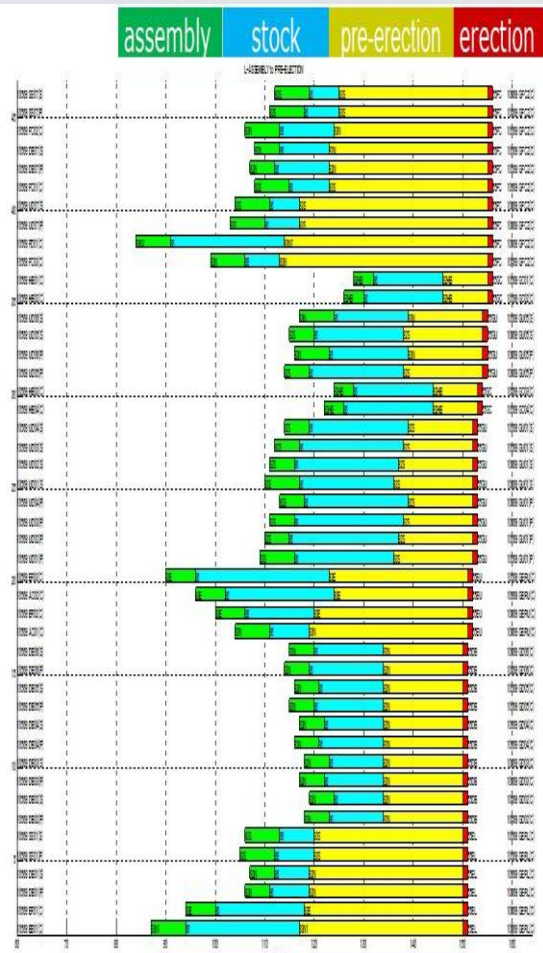
$$a \otimes \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 4 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3+a & 1+a \\ 4+a & 1+a \end{bmatrix}$$

Note that if $a = \eta$, all elements of the resulting matrix are η .

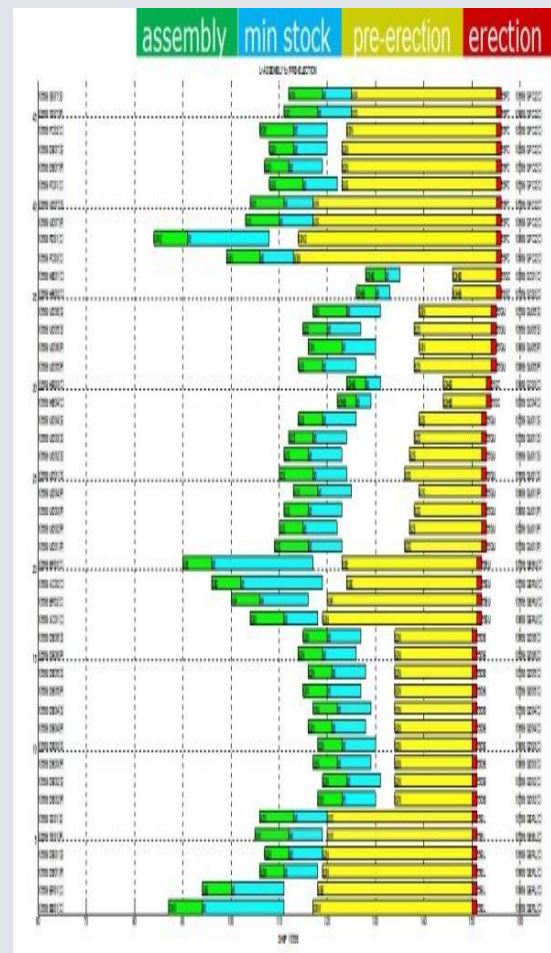
We will subsequently drop the explicit use of the product symbol \otimes , as is customary with regular multiplication. We must keep in mind, however, that ab means $a + b$. This is particularly important in using matrix notation.

Max-Plus法 (一括処理)

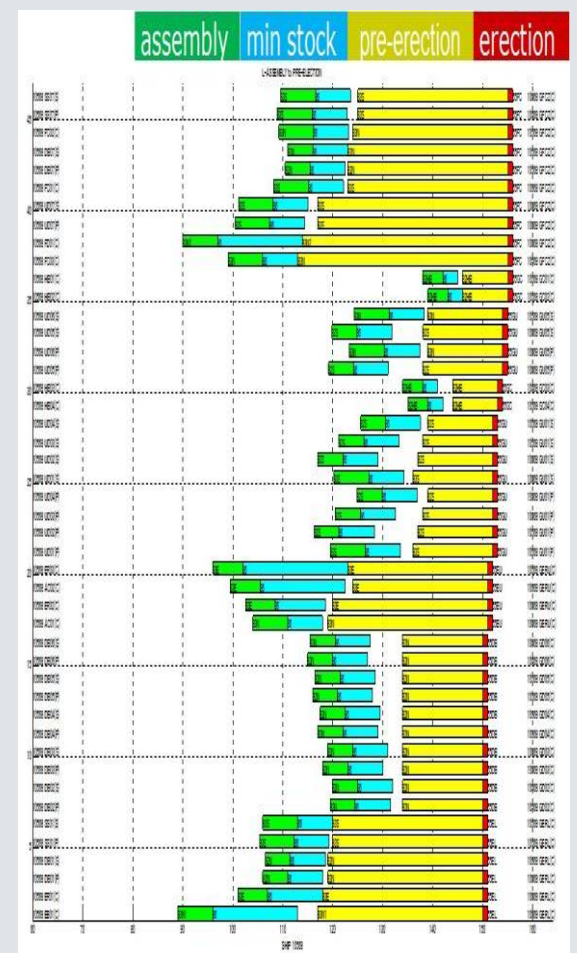
現行計画



アイドル日数(464日)



Max-plus法(215日)



Max-Plus本

Princeton Series in APPLIED MATHEMATICS

Copyrighted Material

Max Plus at Work

*Modeling and Analysis of Synchronized
Systems: A Course on Max-Plus Algebra
and Its Applications*



Bernd Heidergott,
Geert Jan Olsder, and
Jacob van der Woude

Copyrighted Material

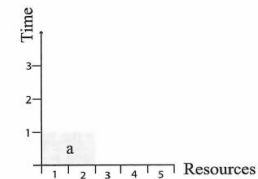


Figure 1.1: Piece a.

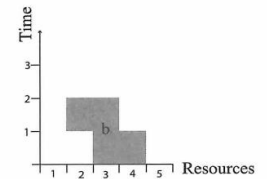


Figure 1.2: Piece b.

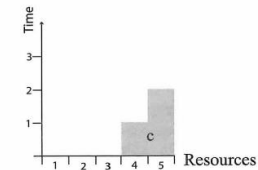


Figure 1.3: Piece c.

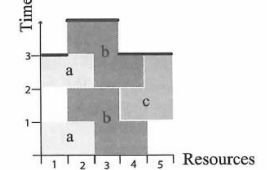


Figure 1.4: The heap $w=abacb$.

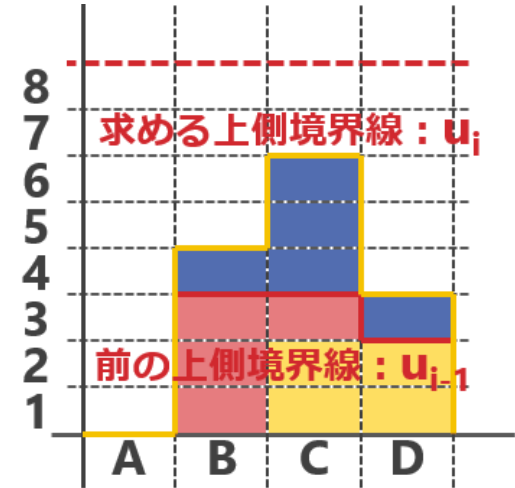
Heapモデル

Heap法(逐次処理)

●プッシュ型計画：ピースを積み上げる

$$u_i = M \otimes u_{i-1} = \begin{bmatrix} e & \epsilon & \epsilon & \epsilon \\ \epsilon & 1 & 1 & 2 \\ \epsilon & 3 & 3 & 4 \\ \epsilon & e & e & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \epsilon \\ 3 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon \\ 4 \\ 6 \\ 3 \end{bmatrix}$$

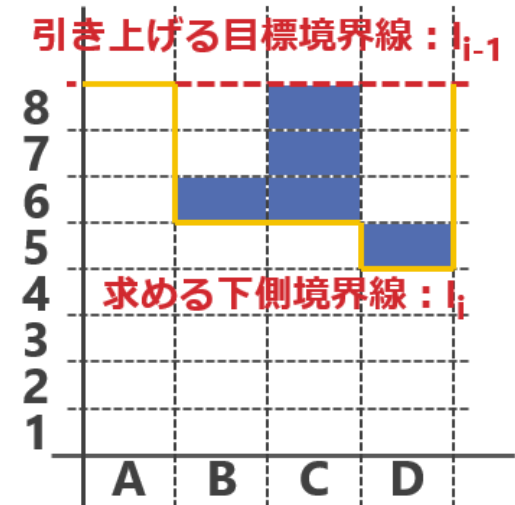
ピースのHEAP行列



●プル型計画：ピースを引き上げる

$$l_{i-1} = M \otimes l_i \Rightarrow l_i = -M^T \otimes (-l_{i-1})$$

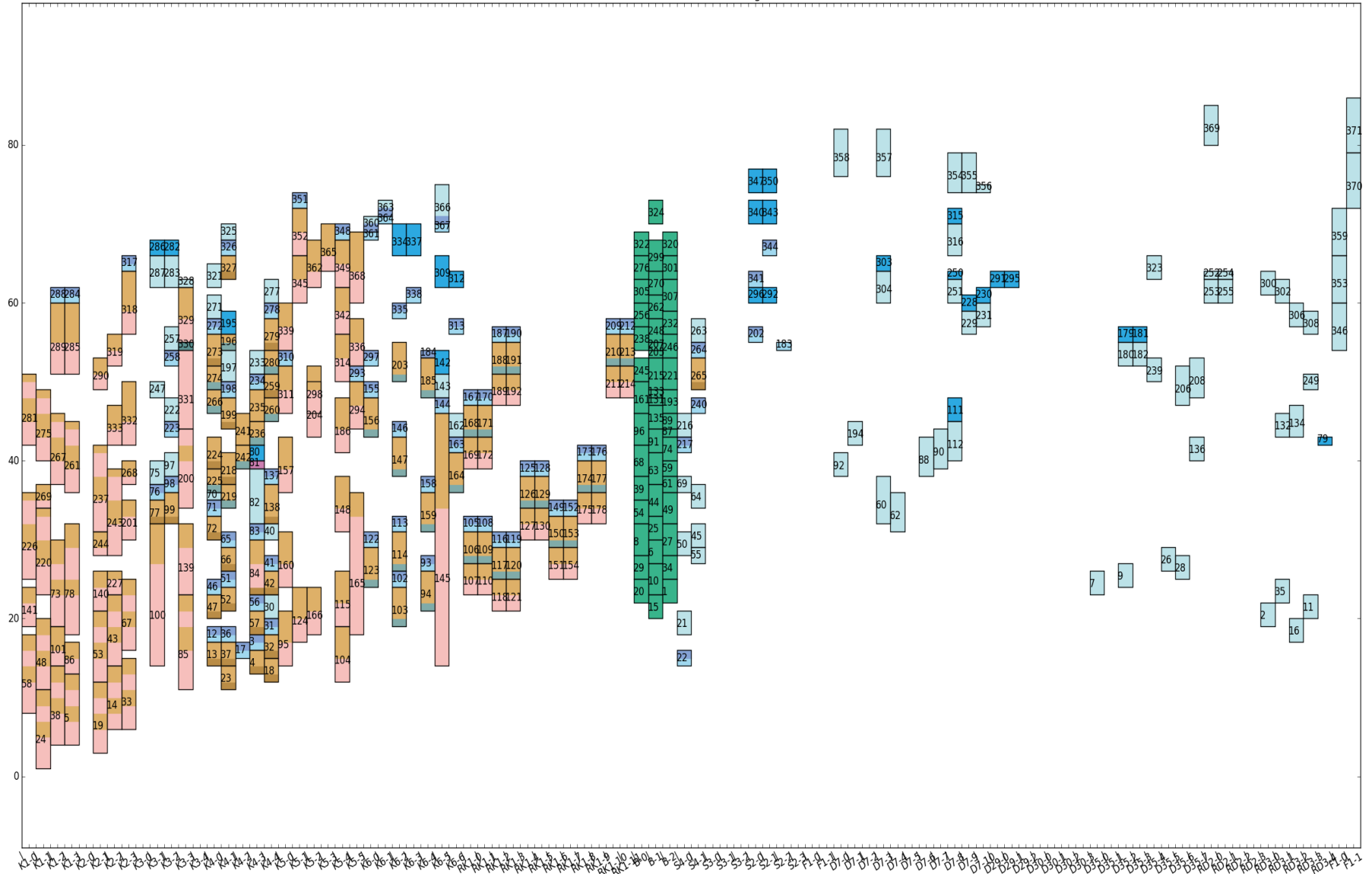
$$= - \begin{bmatrix} e & \epsilon & \epsilon & \epsilon \\ \epsilon & 1 & 1 & 2 \\ \epsilon & 3 & 3 & 4 \\ \epsilon & e & e & 1 \end{bmatrix}^T \otimes \left(- \begin{bmatrix} 8 \\ 8 \\ 8 \\ 8 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 8 \\ 5 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix}$$



- Max演算: $a \oplus b = \max\{a, b\}$
- Max演算の単位元: $a \oplus \epsilon = \max\{a, -\infty\} = a$
- Plus演算: $a \otimes b = a + b$
- Plus演算の単位元: $a \otimes e = a + 0 = a$

HEAPチャート(定盤計画相当)

Usuki Conventional Schedule. Total Idling Time = 1280.0



論文賞

賞状

梶原宏之殿

貴著論文「Max-Plus代数に基づく
ツインタンDEM建造方式の組立日程
計画」は極めて優秀であってわが国
造船技術発展のために貢献する
ところ誠に大なるものがあります
よってここに賞状並びに賞金を贈呈し
表彰します

平成27年5月25日

一般社団法人日本造船工業会

会長 佃 和夫



賞状

正会員 梶原宏之殿

あなたが日本船舶海洋工学会論文集に
おいて発表されました論文「Max-Plus代数に
基づくツインタンDEM建造方式の組立日程
計画」は本会論文審査委員会において
審査の結果日本船舶海洋工学会賞に
値するものと認定されました
よって理事会の議決により賞状ならびに
賞牌を贈呈します

平成27年5月25日

公益社団法人日本船舶海洋工学会

会長 大和裕幸

平準化

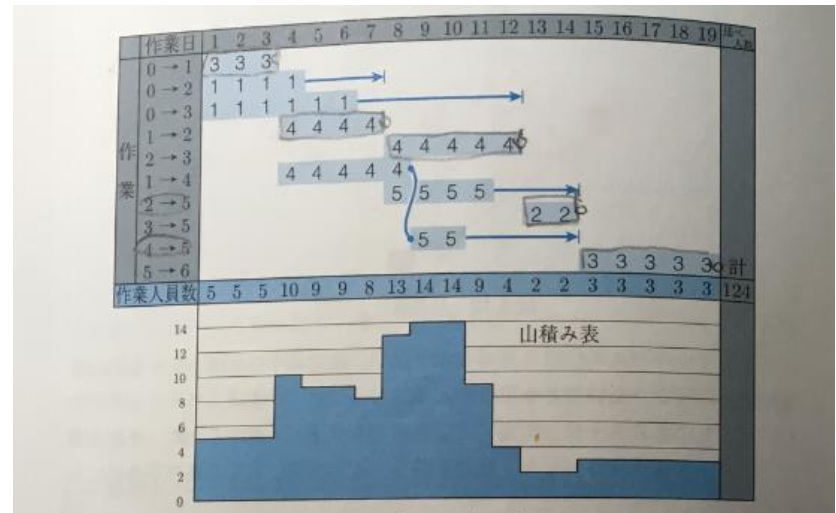


図 5.13 ピークのある計画

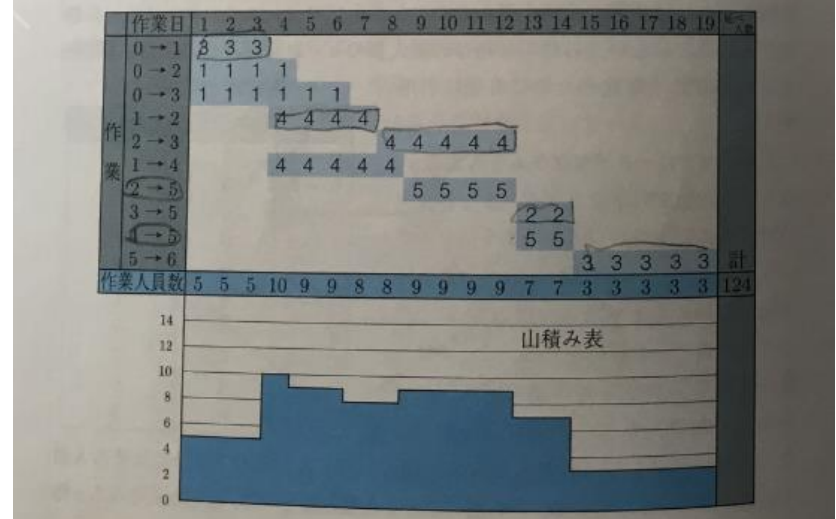
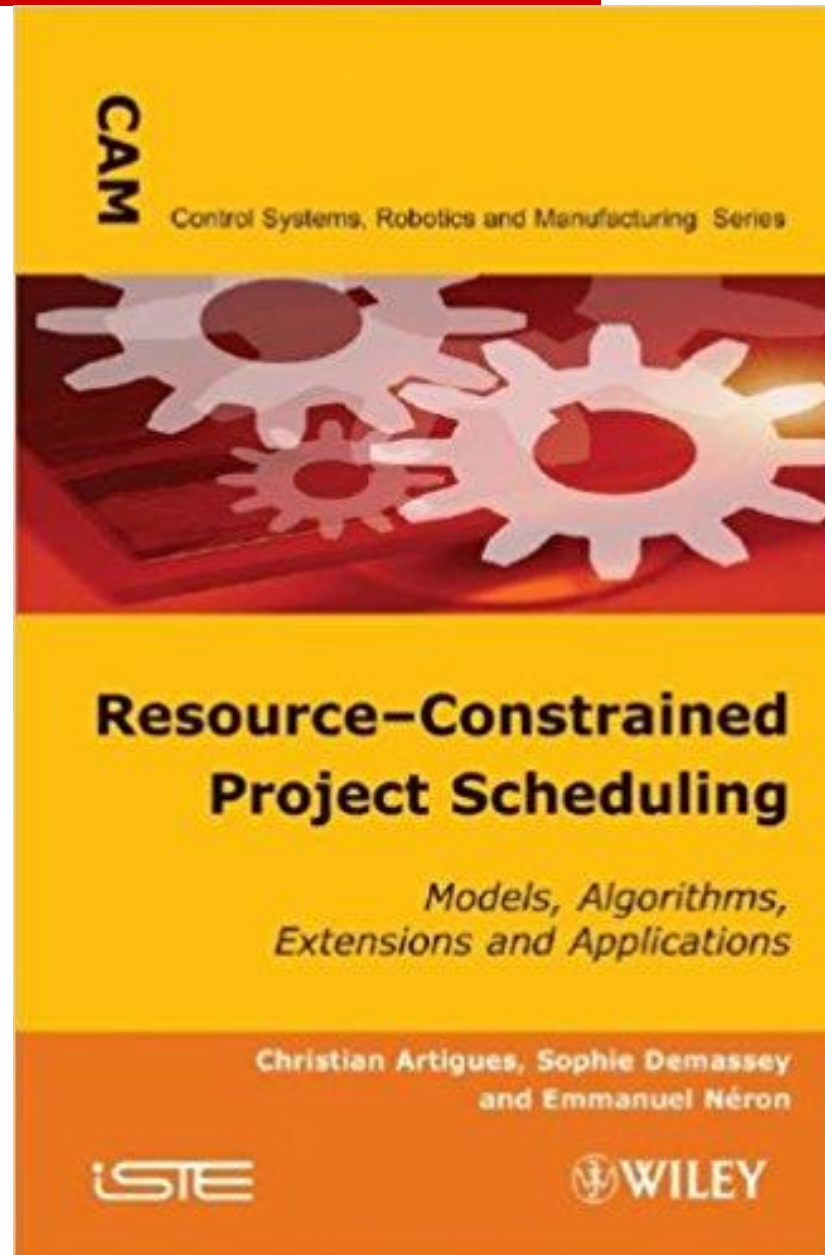


図 5.14 平準化された計画



RCPSP (資源制約付スケジューリング問題)

- **RCPSP** (Resource-Constrained Project Scheduling Problem): $(V, p, E, \mathcal{R}, B, b)$

Find a non-preemptive schedule S of minimal makespan S_{n+1} subject to precedence constraints (1) and resource constraints (2).

メイクスパン(最大完了時刻)を最小化せよ

$$(1) \forall (A_i, A_j) \in E : \underbrace{S_i + p_i}_{C_i} \leq S_j$$

先行制約

$$(2) \forall R_k \in \mathcal{R}, \forall t \geq 0 : \sum_{A_t \in \mathcal{A}_t} b_{ik} \leq B_k$$

資源制約

Min メイクスパン
(各作業の開始時刻)
ただし

- 先行制約
- 資源制約

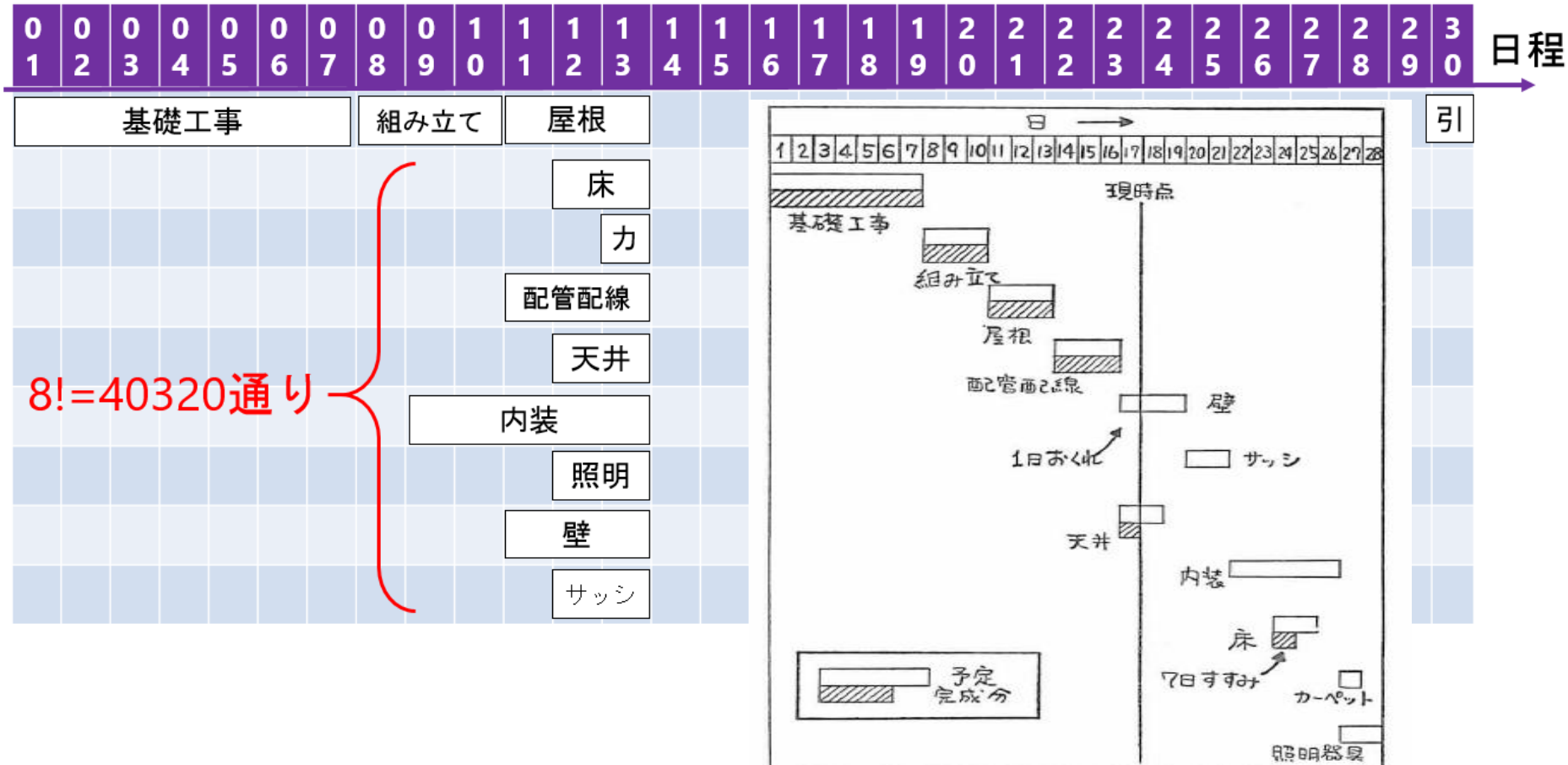
where

- activities: $V = \{A_0, \mathcal{A}, A_{n+1}\}$, $\mathcal{A} = \{A_1, \dots, A_n\}$
- durations: $p \in \mathbf{N}^{n+2}$ (p_i is the duration of activity A_i)
- precedence relations: $E = \{(A_i, A_j) \in \mathcal{A} \times \mathcal{A} : A_i \text{ precedes } A_j\}$
- renewable resources: $\mathcal{R} = \{R_1, \dots, R_q\}$
- availabilities: $B \in \mathbf{N}^q$ (B_k denotes the availability of R_k)
- demands: $b \in \mathbf{N}^{(n+2) \times q}$ (b_{ik} denotes the amount of R_k used per time period during the execution A_i)
- schedule: $S \in \mathbf{R}^{n+2}$ (S_i represents the start time of activity A_i)
- non-dummy activities: $\mathcal{A}_t = \{A_i \in \mathcal{A} : S_i \leq t < S_i + p_i\}$

開始時刻

スケジュールリング問題

- 各作業を時間軸上に配置すること
(様々な制約を満足させる必要)



先行制約

- 作業間の順序関係（ある作業の実施前には他の作業を終えている必要）



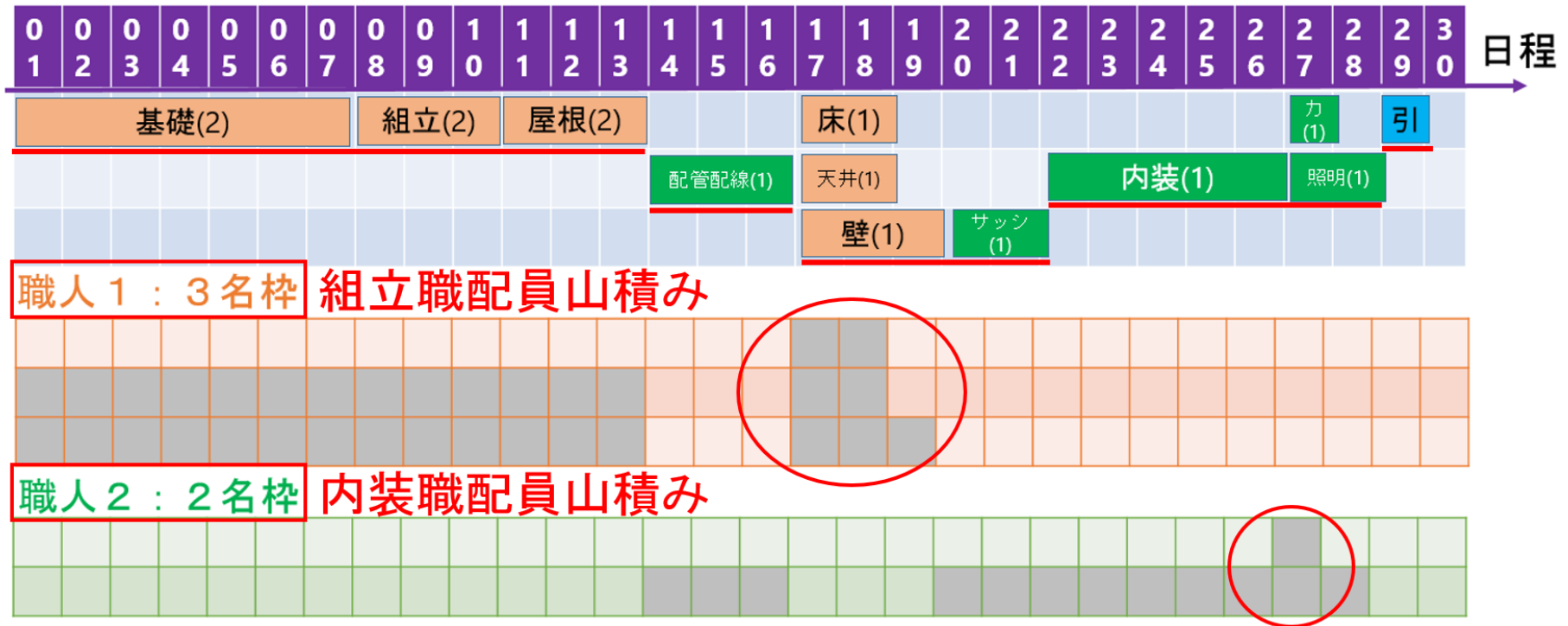
背景が赤の作業はCPを表す

CP:クリティカルパス

プロジェクトの完成を遅らせないためには絶対に遅らせてはならない工程の組合せ

資源制約

- 作業を行うために必要なリソース（設備、道具、職人、資金・・・）の制限



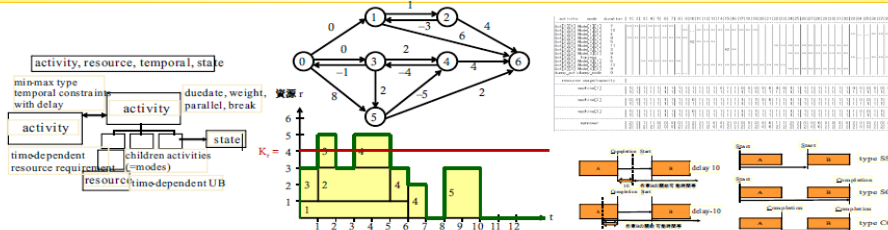
OptSeq

スケジューリング最適化ソルバー

OptSeq オプト・シーク Ver. 2.0

Fastest and Finest Scheduling Solver

OptSeqは手作業による生産計画を大幅に改善する最適化技術を搭載した汎用スケジューリング最適化ソルバーです。また、各種プログラミング言語や Excel から容易に呼び出すことができるため簡単に手持ちのシステムに組み込んで利用することができます。



OptSeqの性能

スケジューリング問題の世界標準のベンチマーク問題集で最速かつ（得られる解の質の意味で）最良であることが実証された汎用スケジューリングソルバーです。

通常の製造現場や市販のソフトウェアで用いられているディスプレイパッチング・ルールと比べると、2割以上の費用の削減が可能になります。

通常のパソコンで、仕事数 1000の問題を1分程度で解くことができ、さらに得られる解の質は誤差1%以内という驚異的な性能をもちます。そのため、大規模な問題に対する What If 分析もストレスを感じることなく行うことができます。

使用環境

プログラミング言語、モデリング言語サポート

- 簡易モデリング言語による入力
- Pythonインターフェイス使用可能
- Excelへのリンクも簡単

ライブラリ呼び出しによる利用可能

ライブラリを利用することによって、最適化を必要とする他のシステムに組み込んで利用することができます。

- C++, Visual Basic, C# などからも呼び出し可能

サポートプラットフォーム

- Windows®, Mac OS®, Linux など

応用可能な問題

- ジョブショップスケジューリング問題
- フローショップスケジューリング問題
- プロジェクトスケジューリング
- 任意の時間制約付きスケジューリング問題
- 資源制約付きスケジューリング問題
- 作業の途中中断を考慮したスケジューリング問題
- 作業モードを考慮したスケジューリング問題
- 状態変化(段取りなど)を考慮したスケジューリング問題
- 作業の並列処理を考慮したスケジューリング問題など

OptSeqの柔軟性

- 幾つもの企業の実務問題で発生した付加条件をすべて考慮し設計されたスケジューリングソルバーです。
- 任意の評価関数を目的関数にすることが可能です。
- OptSeqの標準装備では解くことが困難な問題に対しては、カスタマイズも可能です。

導入コンサルティング&カスタマイズ

LogOptでは、アルゴリズム工学および最適化の最新技術を駆使したコンサルティングを行っています。また、問題に応じたモデル化およびアルゴリズム設計のコンサルティングおよびカスタマイズも同時に行っています。

本カタログに記載されている社名および商品名は、各社の商標または登録商標です。

Optimization Professionals



ログ・オプト

http://www.logopt.com
〒276-0049
千葉県八千代市緑が丘1丁目13-5
jinhua@logopt.com

Python言語による ビジネスアナリティクス

実務家のための 最適化・統計解析・機械学習

久保幹雄・小林和博・斉藤努・並木誠・橋本英樹 著

近代科学社

OptSeqによる問題設定の枠組み

- 目的関数(決定変数は作業開始時刻)
 - 最大完了時刻(左詰め=プッシュ型)
 - 納期遅れ総和(プル型と等価ではない)
- 作業と処理モード
 - 所要時間(中断可能)、必要資源量(時変可能)
 - 処理モード ⇒ 資源選択(定盤計画)
- 先行制約
 - 順序関係⇒連続化、同時開始、納期指定、選択肢継承、未知待機時間の待機場所確保
- 資源制約
 - 許容資源量(時変可能、平準化)
 - 再生可能(繰返し使用可)、再生不可(資金)

OptSeqによる求解法

```

1 from optseq import *↓
2 ex=Model()↓
3 #----基礎データの定義↓
4 data=[#↓
5 1:[7,[2],2,0],#↓
6 2:[3,[3],2,0],#↓
7 3:[3,[4,6],2,0],#↓
8 4:[2,[5],1,0],#↓
9 5:[1,[12],0,1],#↓
10 6:[3,[7,10],0,1],#↓
11 7:[2,[8],1,0],#↓
12 8:[5,[9,5],0,1],#↓
13 9:[2,[12],0,1],#↓
14 10:[3,[11],1,0],#↓
15 11:[2,[8],0,1],#↓
16 12:[1,[0],0,0],#↓
17 ]↓
18 res1=ex.addResource("worker1",capacity=[(0,"inf"):2])↓
19 res2=ex.addResource("worker2",capacity=[(0,"inf"):1])↓
20 #----作業の定義とモードの
21 act=[]↓
22 mode=[]↓
23 for i in data:↓
24     act[i]=ex.addActivity("Act[{}]" .format(i))↓
25     mode[i]=Mode("Mode[{}]" .format(i),data[i][0])↓
26     if data[i][2]>0:↓
27         mode[i].addResource(res1,requirement=data[i][2])↓
28     if data[i][3]>0:↓
29         mode[i].addResource(res2,requirement=data[i][3])↓
30     act[i].addModes(mode[i])↓
31 #----先行制約の定義↓
32 for i in data:↓
33     if i<12:↓
34         for j in data[i][1]:↓
35             ex.addTemporal(act[i].act[j])↓
36 #----最適化↓
37 ex.Params.TimeLimit=1↓
38 ex.Params.Makespan=True↓
39 ex.Params.OutputFlag=True↓
40 ex.optimize()↓
41 ex.writeExcel("ex_result.csv")↓
42 ex.write("ex.txt")↓

```

基礎データの定義

【資源制約】

職人1:2名様

職人2:1名様

作業の定義とモードの割当て

先行制約の定義

最適化

【先行制約】 (必要資源)

作業項目	作業期間	順序関係		職人1	職人2
1 基礎工事	7	2		2	
2 組み立て	3	3		2	
3 屋根	3	4	6	2	
4 床	2	5		1	
5 カーペット	1	12			1
6 配管配線	3	7	10		1
7 天井	2	8		1	
8 内装	5	9	5		1
9 照明	2	12			1
10 壁	3	11		1	
11 サッシ	2	8			1
12 引き渡し	1	0			

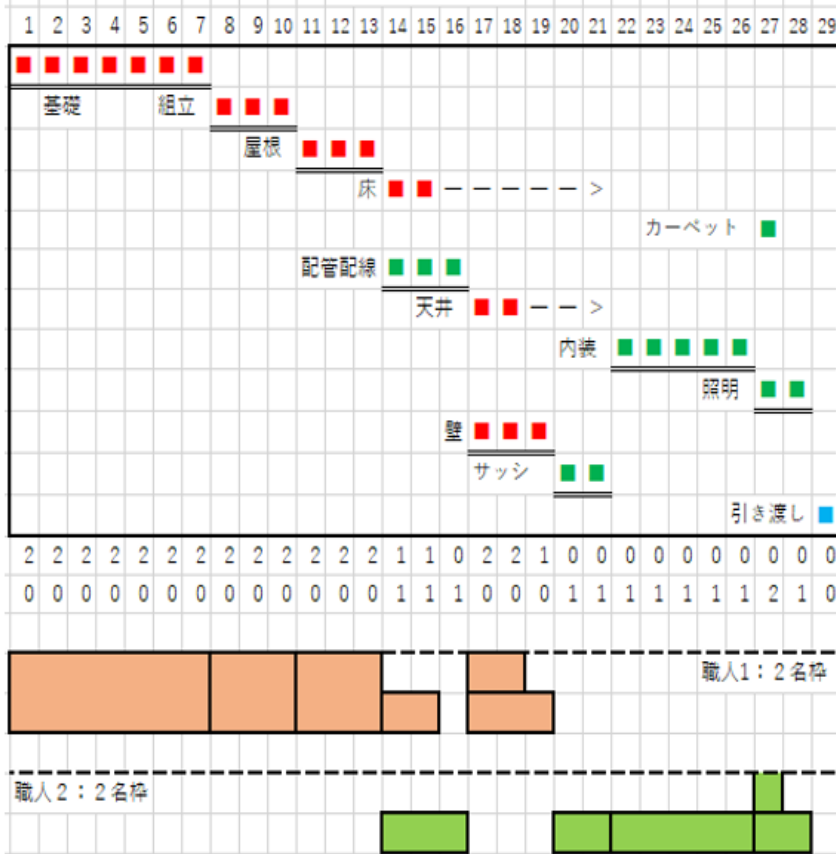
- 作業を実施するモードの選択
- モードに詳細な資源制約を反映させる

OptSeqによる求解結果(平準化)

ケース1

メイクスパン=29

【資源制約】
職人1:2名枠
職人2:2名枠

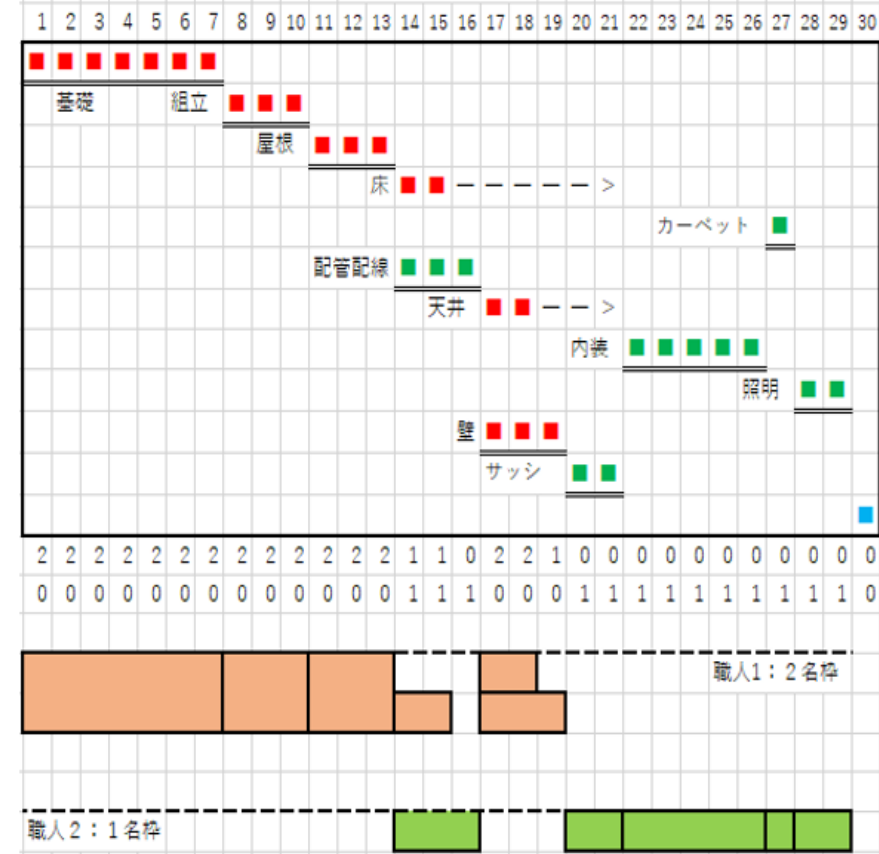


●CP上でない「床」「天井」は移動可能

ケース2

メイクスパン=30

【資源制約】
職人1:2名枠
職人2:1名枠



●資源の許容量を変えることで平準化が可能

PERTとCPM

PERT: Program Evaluation and Review Technique

CPM: Critical Path Method

	作業項目	作業時間	先行関係	職人 1	職人 2	短縮時間
1	基礎	7	2	2		7
2	組み立て	3	3	2		3
3	屋根	3	4	2	6	3
4	床	2	5	1		2
5	カーペット	1	12		1	1
6	配管配線	3	7	10	1	1
7	天井	2	8	1		2
8	内装	5	9	5	1	3
9	照明	2	12		1	1
10	壁	3	11	1		3
11	サッシ	2	8		1	1
12	引き渡し	1	0			1

●通常の資源は繰り返し使える再生可能資源。これに対し資金は使用するとなくなっていくので再生不能資源とよぶ。

●資金を投入することにより、CP上の作業を短縮できるが、どの程度の資金が望ましいか？(熟練作業員を雇用できるので)

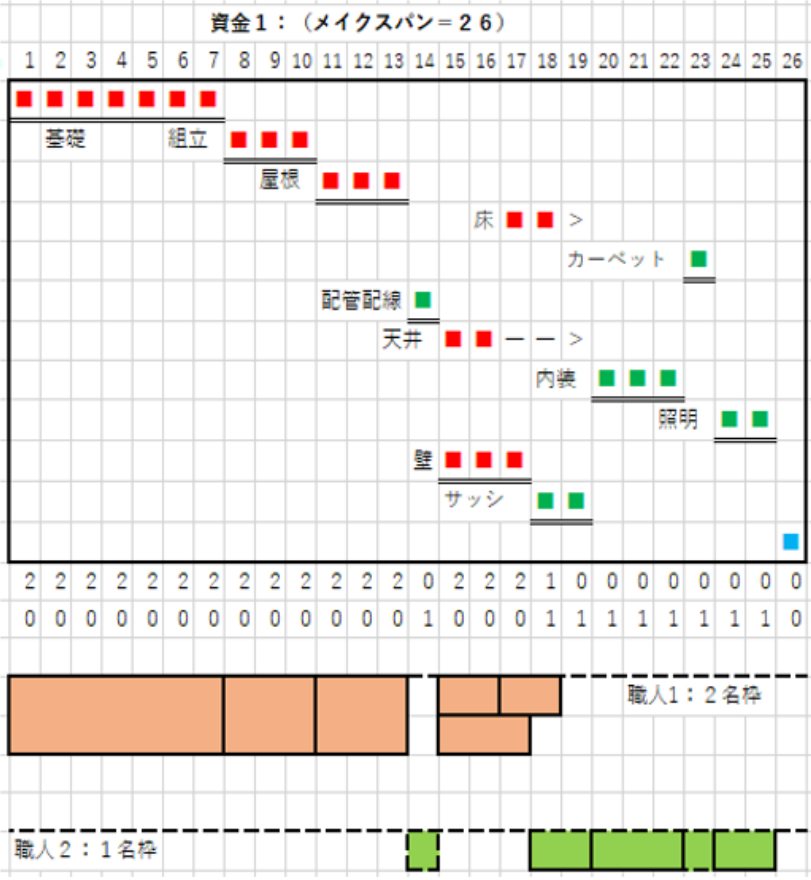
●要点

- ・CP:メイクスパンを決定
- ・PERT:CPを求める方法
- ・CPM:妥当なコスト・パフォーマンス(C/P)を探る方法

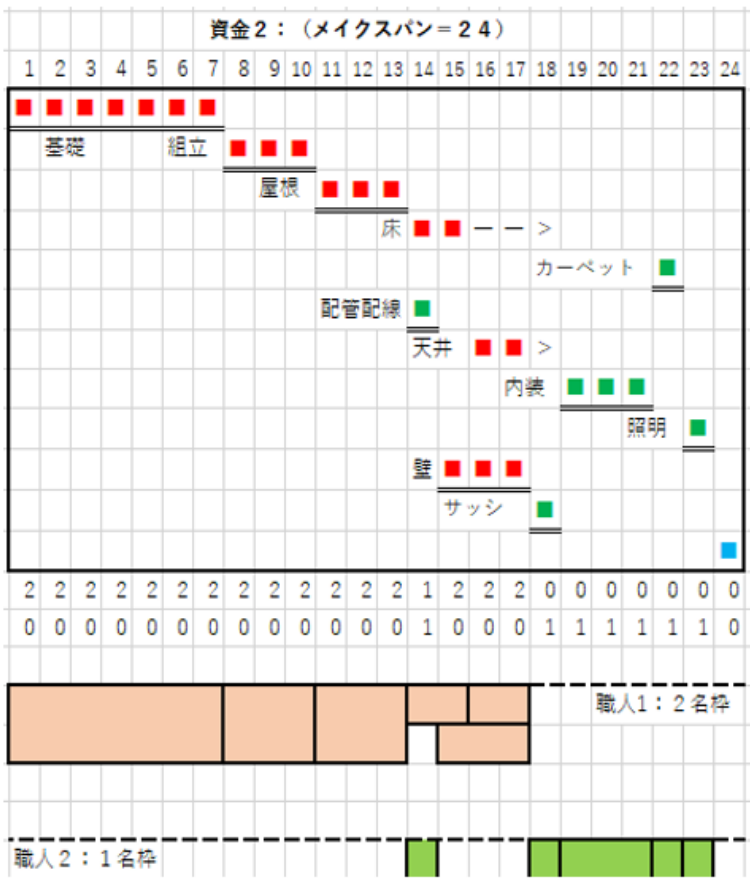
	リソース	許容量	再生不能 リソース	許容量
1	職人 1	2	1 資金 1	2
2	職人 2	1	2 資金 2	4

OptSeqによる求解結果（再生不可資源）

資金 1



資金 2



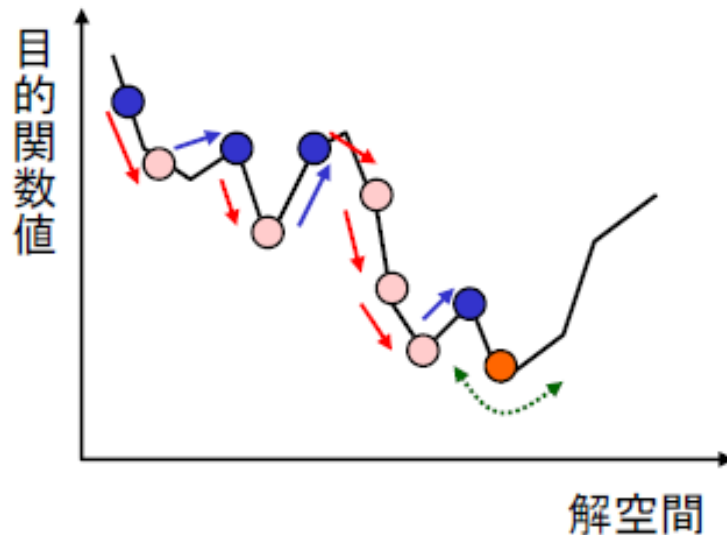
●CP上の「配管配線」「内装」が短縮された

●CP上の「照明」「サッシ」も短縮された

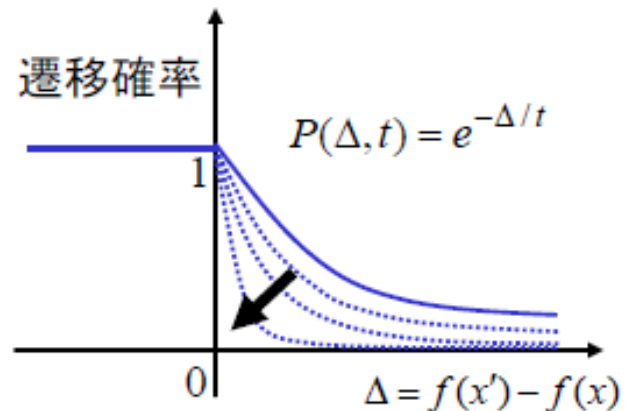
局所探索法(今堀慎治先生PPT)

アニーリング法 (Simulated Annealing)

近傍内からランダムに解を選択し、改善なら移動する。
改悪ならその度合いと温度に応じた確率で移動する。



現在の解 x から近傍解 x' への遷移確率



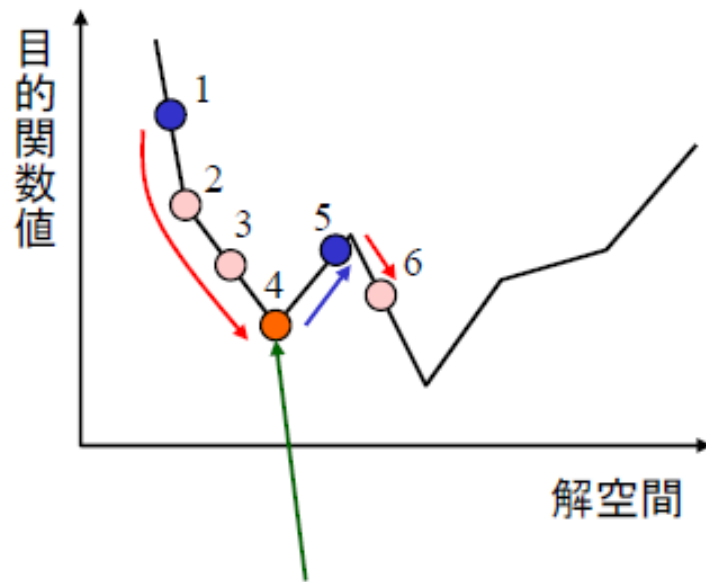
遷移確率は、物理現象の**焼きなまし**(annealing)にアイデアを借りて、温度と呼ばれるパラメータ t により調整する。

➡ 時間の経過に従って $t \rightarrow 0$ となり改悪時の遷移確率は限りなく0に近づく。

局所探索法(今堀慎治先生PPT)

タブー探索法 (Tabu Search)

近傍内で最も良い解に(改悪であっても)常に移動する。
探索済みの解に後戻りする巡回(cycling)を防ぐため、
タブーリストを用いて後戻りを「しばらくの間」禁止する。



現在の解	タブーリスト(長さ3)		
1	—	—	—
2	1	—	—
3	1	2	—
4	1	2	③
5	2	3	④
6	3	4	5

タブーリストにある解には移動できない

近傍内からタブーリストにある解を除いたものを次の移動先候補とする。

造船工程計画問題への新アプローチ

■ 造船工程計画問題

- 日程計画(ブロック製作の開始日を決定)
- 定盤計画(ブロック製作の定盤を決定)
- 配員計画(ブロック製作を行う作業員数の平準化)

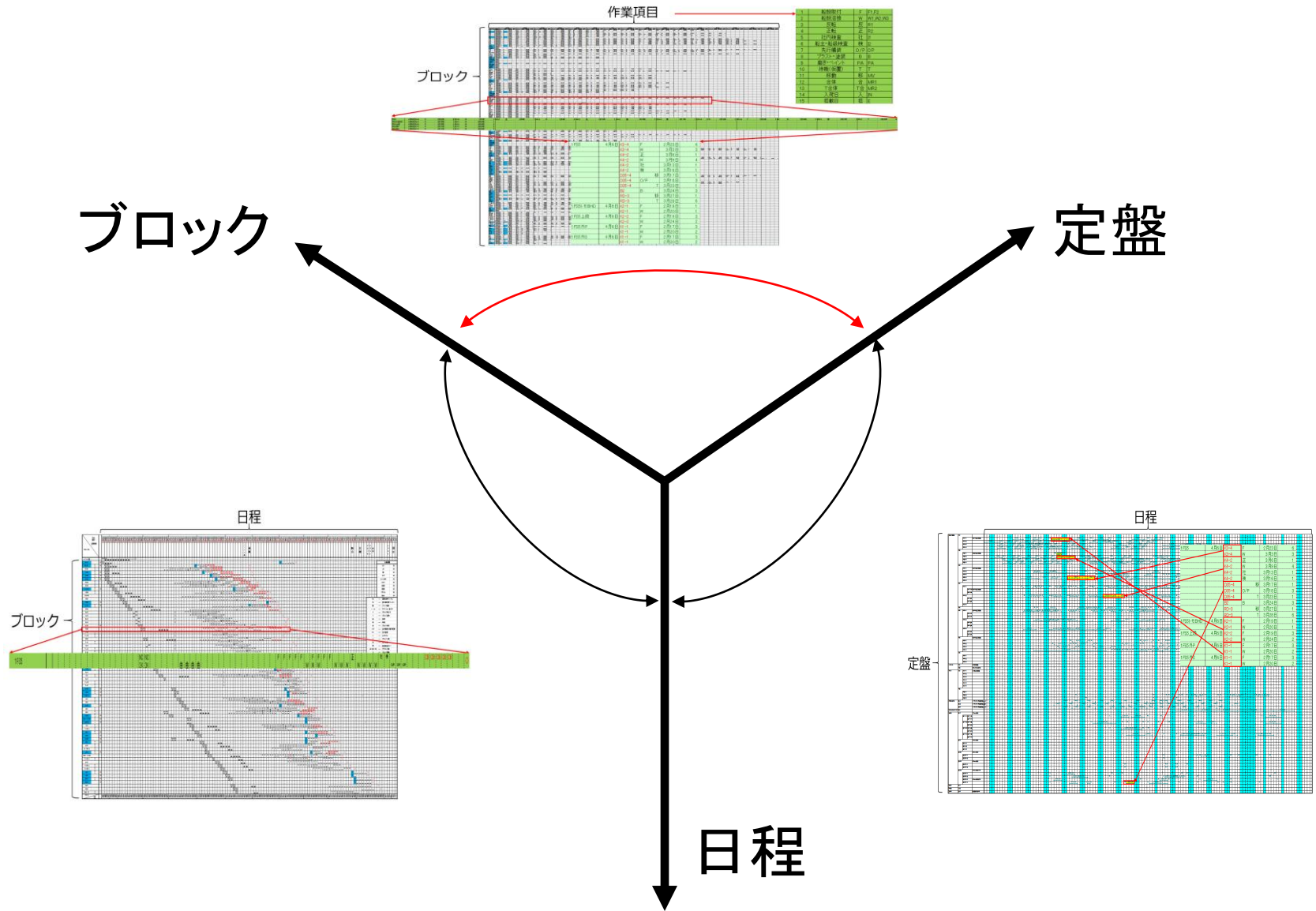
■ 計画問題の困難さ

- 日程計画と定盤計画の連携が至難の業
- 実績のある計画を手作業で調整

■ アプローチ

- 資源制約付スケジューリング問題として定式化
- 局所探索法(タブーサーチ)に基づくスケジューリング最適化ソルバーOptSeqを適用

工程計画の難しさ

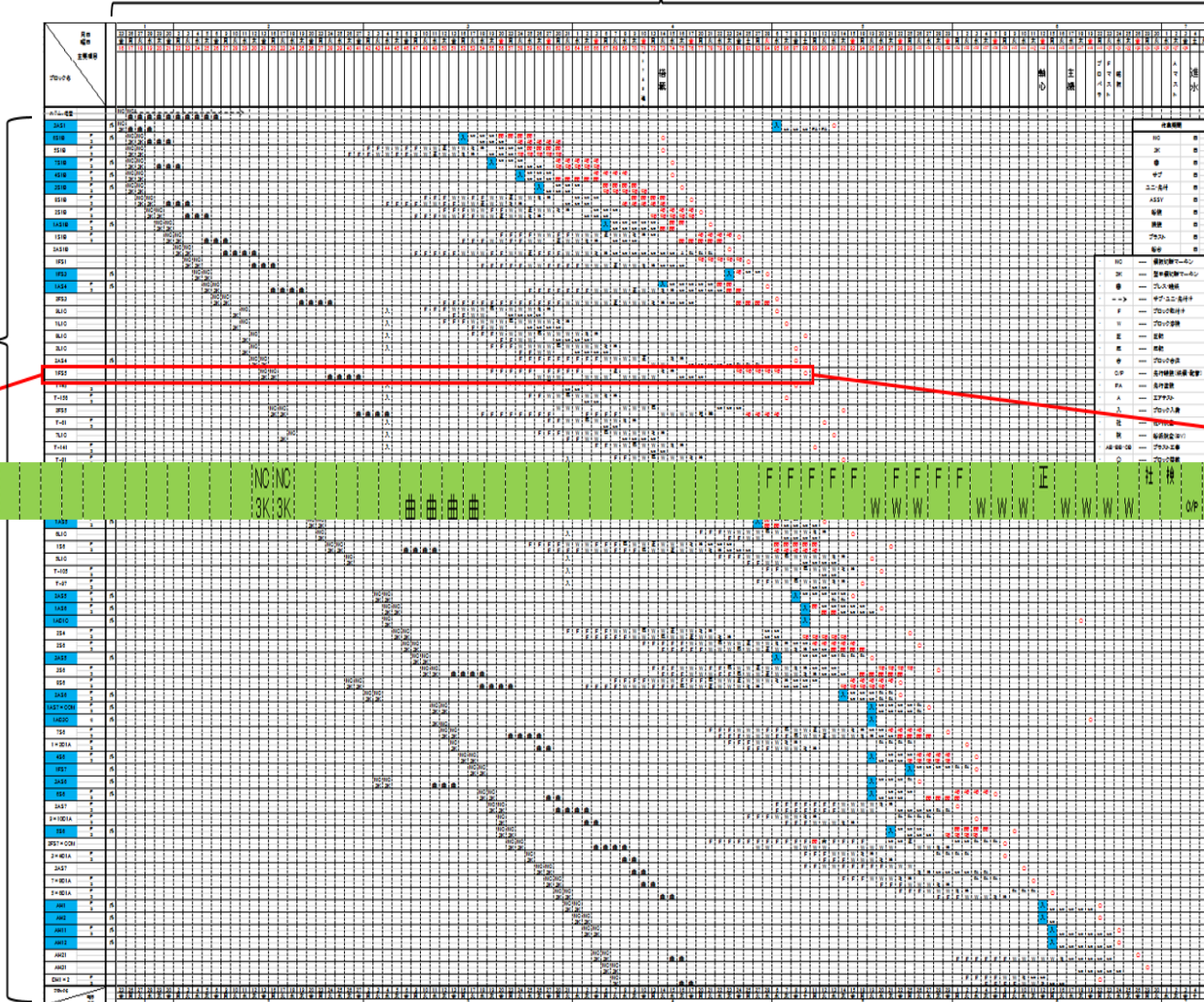


日程計画の実例 (ガントチャート)

日程

ブロック

1F55

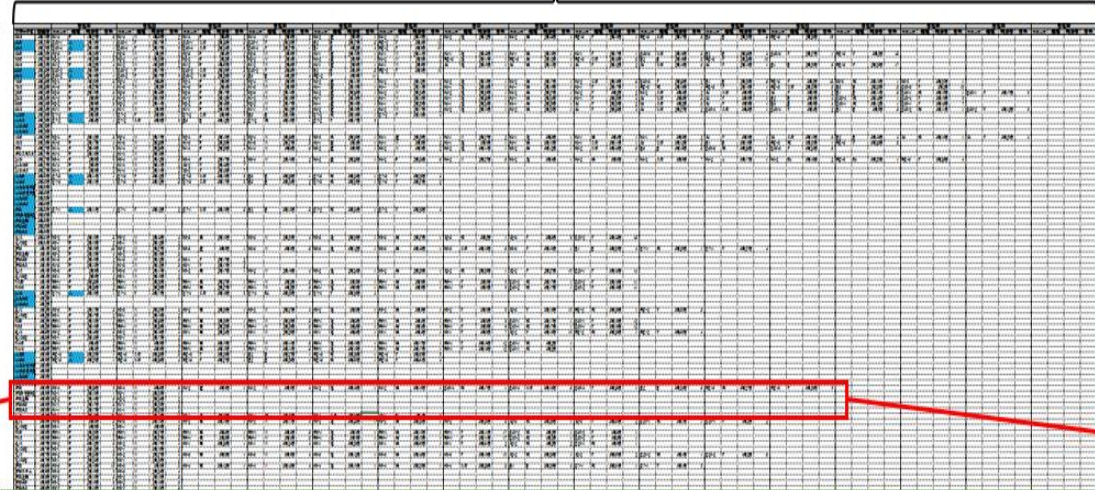


計画の実作業

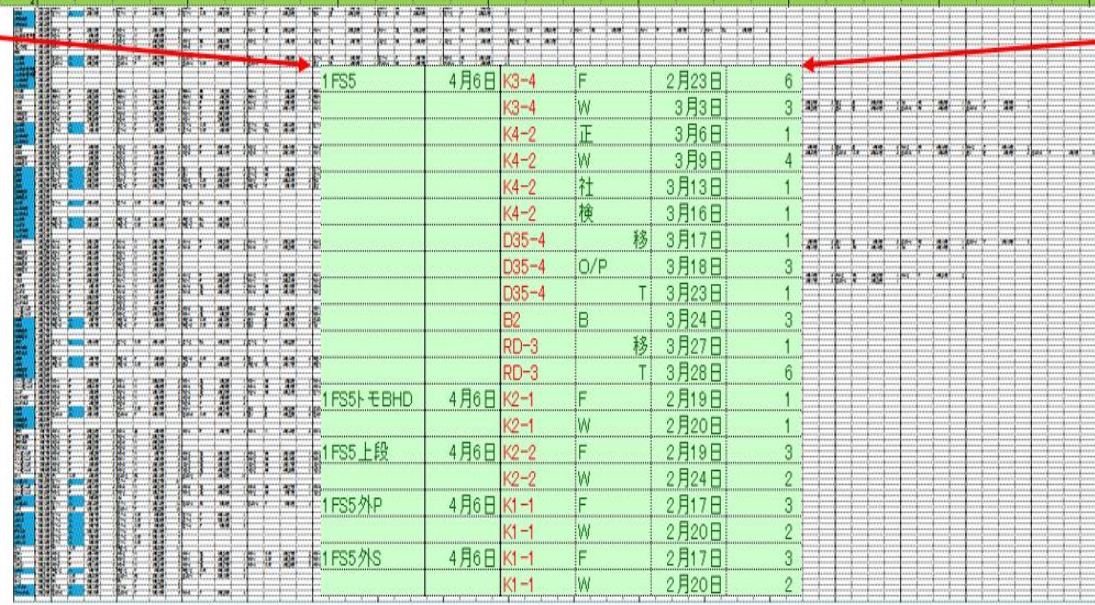
作業項目

1	船殻取付	F	F1,F2
2	船殻溶接	W	W1,W2,W3
3	反転	反	R1
4	正転	正	R2
5	社内検査	社	I1
6	船主・船級検査	検	I2
7	先行艤装	O/P	OP
8	プラスト・塗装	B	B
9	磨き・ペイント	PA	PA
10	待機(仮置)	T	T
11	移動	移	MV
12	合体	合	MR1
13	T合体	T合	MR2
14	入荷日	入	IN
15	搭載日	搭	E

ブロック



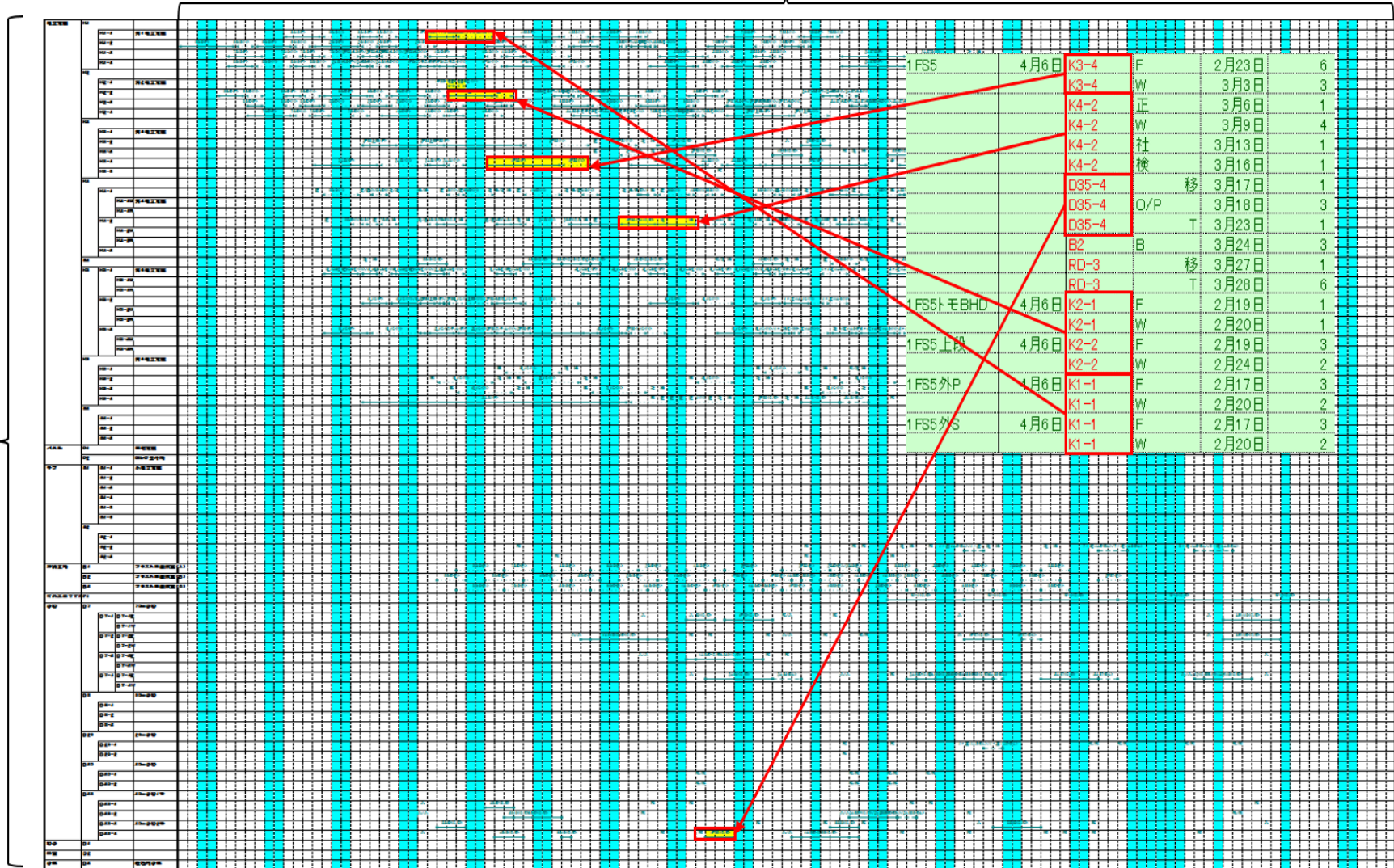
1FS5	4月6日	K3-4	F	2月23日	6
1FS5+BHD	4月6日	K3-1	F	2月19日	1
1FS5上段	4月6日	K2-2	F	2月19日	3
1FS5外P	4月6日	K1-1	F	2月17日	3
1FS5外S	4月6日	K1-1	F	2月17日	3



定盤計画の実例

日程

定盤



ブロック建造過程

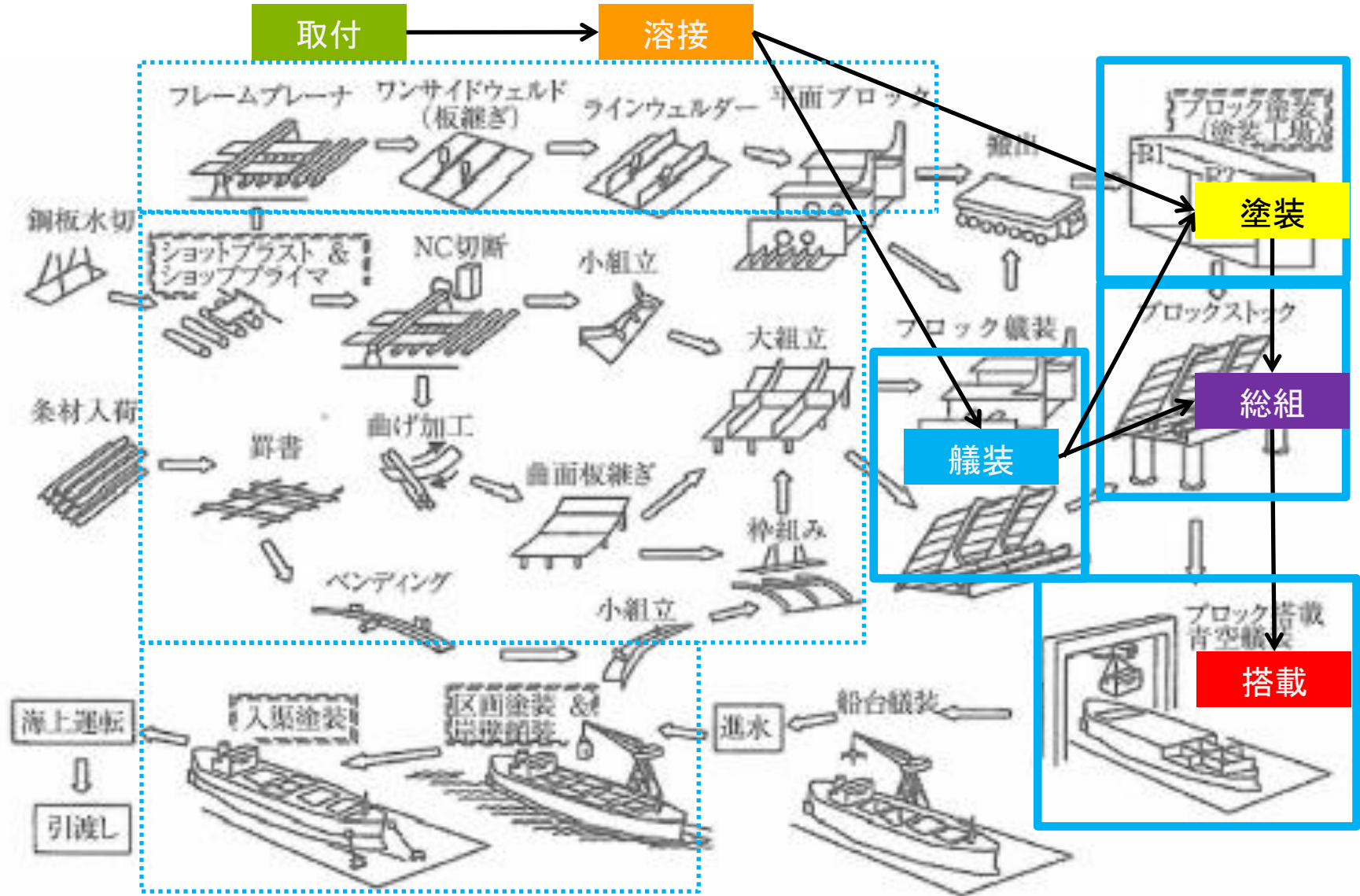


図 1.3-1 鋼船建造過程

計画問題

■ 先行制約： アクティビティの整理

- 組立作業の再定義、グループ化
- 待機のアクティビティ



■ 資源制約： レベル1（許容量だけを管理）

- 組立定盤、ストックヤード
- 職人（取付、溶接）

■ 資源制約： レベル2（個別資源まで管理）

- 定盤計画、待機場所
- クレーン共釣り
- 屋根高さ制限

アクティビティの整理(必要性)

■ 必要性

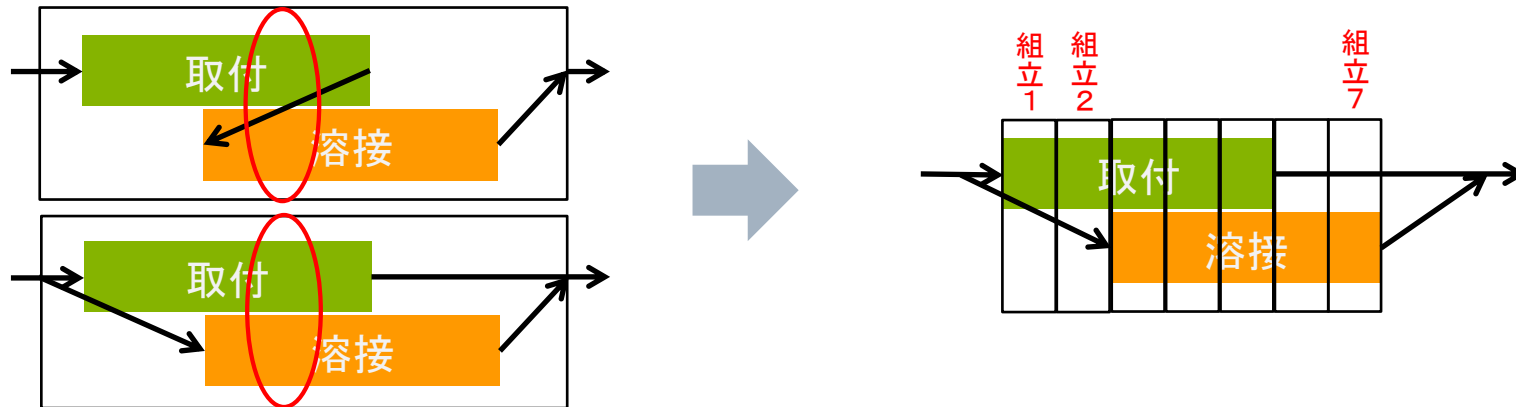
- ブロック建造方式では1隻あたり、数百～数千個のアクティビティをもち、資材発注のために半年前に数隻を同時に計画するため、アクティビティ数は数千～数万個にも及ぶ
- OptSeqの適用時には、局所探索のコストパフォーマンスから**2000個**程度が妥当なアクティビティ数

■ スケジューリング学会での発表

- 1つの作業が多くの小作業で構成されていた場合を考える。この流れを1つの大作業と仮定し、小作業で構成されその間を**中断(break)**で結ぶ手法

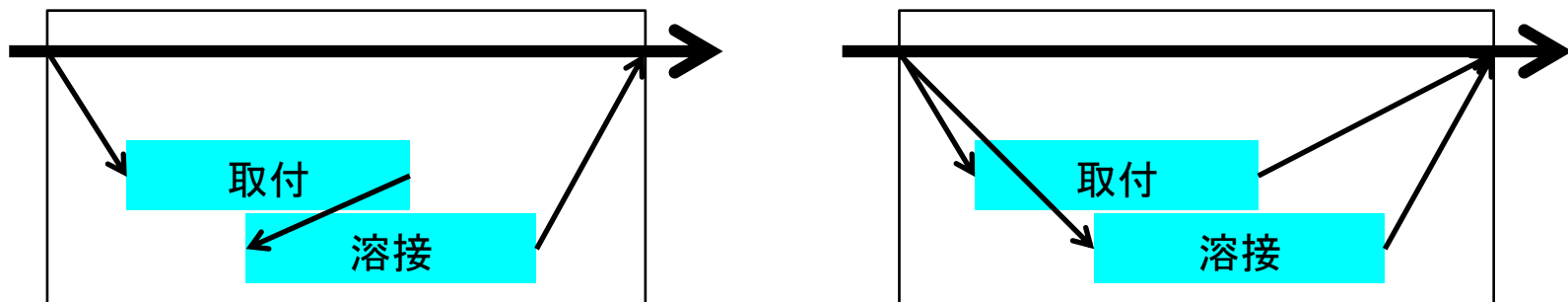
アクティビティの整理(手法)

■ 先行化と並列化⇒組立作業の再定義



リソースのダブルカウントが発生

■ グループ化(ハンモック化)



リソースの割り当てが必要

OptSeqは左詰め計画

activity	mode	duration	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
Act[1]	Mode[1]	5	== == == == ==
Act[2]	Mode[2]	1	==
resource usage/capacity			
place			1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1
			1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

```

from optseq import *
ex=Model()
data={¥
1:[5,2,"inf"],¥
2:[1,0,10],¥
}
res0=ex.addResource("place",1)
act={}
mode={}
for i in data:
    act[i]=ex.addActivity("Act[{}]" .format(i))
    mode[i]=Mode("Mode[{}]" .format(i),data[i][0])
    mode[i].addResource(res0,1)
act[i].addModes(mode[i])
for i in data:
    if not data[i][1]==0:
        ex.addTemporal(act[i],act[data[i][1]])
for i in data:
    if not data[i][2]=="inf":
        ex.addTemporal("source",act[i],"SS",delay= data[i][2])
        ex.addTemporal(act[i],"source","SS",delay=-data[i][2])
ex.Params.TimeLimit=1
ex.Params.Makespan=True
ex.optimize()
ex.write("ex.txt")

```

Break機能によるその場待機

activity	mode	duration	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
Act[1]	Mode[1]	5	== == == == ==
Act[2]	Mode[2]	1	==
resource usage/capacity			
place			1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
			1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

```

from optseq import *
ex=Model()
data={¥
1:[5,2,"inf"],¥
2:[1,0,10],¥
}
res0=ex.addResource("place",1)
act={}
mode={}
for i in data:
    act[i]=ex.addActivity("Act[{0}]".format(i))
    mode[i]=Mode("Mode[{0}]".format(i),data[i][0])
    mode[i].addResource(res0,1)
    mode[i].addBreak(0,'inf',10)
    mode[i].addResource(res0,1,'break')
    act[i].addModes(mode[i])
for i in data:
    if not data[i][1]==0:
        ex.addTemporal(act[i],act[data[i][1]],tempType="CS",delay=0)
        ex.addTemporal(act[data[i][1]],act[i],tempType="SC",delay=0)
for i in data:
    if not data[i][2]=="inf":
        ex.addTemporal("source",act[i],"SS",delay= data[i][2])
        ex.addTemporal(act[i],"source","SS",delay=-data[i][2])
ex.Params.TimeLimit=1
ex.Params.Makespan=True
ex.optimize()
ex.write("ex.txt")

```

使用期間制限によるその場待機

activity	mode	duration	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
Act[1]	Mode[1]	10	== == == == == == == == ==
resource usage/capacity			
place			1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
worker1			1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
			1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
worker2			0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0
			0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0

◎この例では、2週間（実働10日間）の1つの作業を定盤placeで行う。2日間の取付作業と2日間の溶接作業を想定している。一方、取付職worker1は第1週目のみ、溶接職worker2は第2週目のみ割当できる。

◎このような状況をOptSeqでスケジューリングしてみると上のガントチャートを得た。「..」が中断を表している。中断中もplaceを使用している。また、第1週に取付職が、第2週に溶接職が割当されている。

```
from optseq import *
ex18=Model()
data={¥
1:[10],¥
}
res0=ex18.addResource("place",1)
res1=ex18.addResource("worker1",{(0,5):1})
res2=ex18.addResource("worker2",{(5,10):1})
act={}
mode={}
for i in data:
    act[i]=ex18.addActivity("Act[{}]" .format(i))
    mode[i]=Mode("Mode[{}]" .format(i),data[i][0])
    mode[i].addResource(res0,1)
    mode[i].addResource(res0,1,'break')
    mode[i].addResource(res1,{(0,2):1})
    mode[i].addResource(res2,{(2,4):1})
    mode[i].addBreak(0,'inf',10)
    act[i].addModes(mode[i])
ex18.Params.TimeLimit=1
ex18.Params.Makespan=True
ex18.optimize()
ex18.write("ex18.txt")
```

許容量制限によるその場待機

activity	mode	duration	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
Act[1]	Mode[1]	10	== == == == == == == == ==
Act[2]	Mode[2]	10	== == == == == == == == ==
resource usage/capacity			
place			2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1
worker1			2 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
worker2			0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0

◎この例では、2週間（実働10日間）の2つの作業を定盤placeで行う。いずれも2日間の取付作業と2日間の溶接作業を想定している。一方、取付職worker1は第1週目のみ2名、溶接職worker2は第2週目のみ1名、割当できる。

◎このような状況をOptSeqでスケジューリングしてみると上のガントチャートを得た。「..」が中断を表している。中断中もplaceを使用している。また、第1週に取付職が、第2週に溶接職が許容量を守って割当されている。

```

from optseq import *
ex18=Model()
data={¥
1:[10],¥
2:[10],¥
}
res0=ex18.addResource("place",2)
res1=ex18.addResource("worker1",{ (0,5):2})
res2=ex18.addResource("worker2",{ (5,10):1})
act={}
mode={}
for i in data:
    act[i]=ex18.addActivity("Act[{}]" .format(i))
    mode[i]=Mode("Mode[{}]" .format(i),data[i][0])
    mode[i].addResource(res0,1)
    mode[i].addResource(res0,1,'break')
    mode[i].addResource(res1,{ (0,2):1})
    mode[i].addResource(res2,{ (2,4):1})
    mode[i].addBreak(0,'inf',10)
    act[i].addModes(mode[i])
ex18.Params.TimeLimit=1
ex18.Params.Makespan=True
ex18.optimize()
ex18.write("ex18.txt")

```


仮想アクティビティによる待機

activity	mode	duration	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Act[1]	Mode[1]	5		==		==		==		==		==		
Act[2]	Mode[2]	1												
Wait[001]	mode[001]	0							
resource usage/capacity														
place				1		1		1		1		0		0
stock				0		0		0		0		1		1
				1		1		1		1		1		1

```

from optseq import *
ex=Model()
data={¥
1:[5,-2,"inf"],¥
2:[1,0,10],¥
}
res0=ex.addResource("place",1)
res1=ex.addResource("stock",1)
act={}
mode={}
for i in data:
    act[i]=ex.addActivity("Act[{}]" .format(i))

mode[i]=Mode("Mode[{}]" .format(i),data[i][0])
mode[i].addResource(res0,1)
act[i].addModes(mode[i])
for i in data:
    if not data[i][1]==0:
        ex.addTemporal(act[i],act[abs(data[i][1])],temp
Type="CS",delay=0)

```

```

d_act={}
d_mode={}
for i in data:
    if data[i][1]<0:
        d_act[i]=ex.addActivity("Wait[{}:03d]" .format(i))
        d_mode[i]=Mode("mode[{}:03d]" .format(i))
        d_mode[i].addBreak(0,0)
        d_mode[i].addResource(res1,{(0,"inf"):1},"break")
        d_act[i].addModes(d_mode[i])
        ex.addTemporal(act[i],d_act[i],tempType="CS")
        ex.addTemporal(d_act[i],act[i],tempType="SC")
        ex.addTemporal(d_act[i],act[abs(data[i][1])],tempType="CS")
        ex.addTemporal(act[abs(data[i][1])],d_act[i],tempType="SC")
for i in data:
    if not data[i][2]=="inf":
        ex.addTemporal("source",act[i],"SS",delay= data[i][2])
        ex.addTemporal(act[i],"source","SS",delay=-data[i][2])
ex.Params.TimeLimit=1
ex.Params.Makespan=True
ex.optimize()
ex.write("ex.txt")

```

逆順で左詰め、折返せばプル型計画

activity	mode	duration	1 2 3 4 5 6	折り返す	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
Act[1]	Mode[1]	5	= = = = =	↷	= = = = =
Act[2]	Mode[2]	1	=		=
resource usage/capacity					
place			1 1 1 1 1 1		0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1
			1 1 1 1 1 1		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

```

from optseq import *
ex=Model()
data={¥
1:[5,0,"inf"],¥
2:[1,1,0],¥
}
res0=ex.addResource("place",1)
act={}
mode={}
for i in data:
    act[i]=ex.addActivity("Act[{0}]" .format(i))
    mode[i]=Mode("Mode[{0}]" .format(i),data[i][0])
    mode[i].addResource(res0,1)
    mode[i].addResource(res0,1,'break')
    mode[i].addBreak(0,'inf',10)
    act[i].addModes(mode[i])
for i in data:
    if not data[i][1]==0:
        ex.addTemporal(act[i],act[data[i][1]])
for i in data:
    if not data[i][2]=="inf":
        ex.addTemporal("source",act[i],"SS",delay= data[i][2])
        ex.addTemporal(act[i],"source","SS",delay=-data[i][2])
ex.Params.TimeLimit=1
ex.Params.Makespan=True
ex.optimize()
ex.write("ex.txt")

```

【例題】 リソースとモード

リソース1

	組立定盤 J	L=20 —	W=6 5~6	高さ H
m	0~1	1~2	—	5~6
0~2	J10	J20	—	J60
2~4	J11	J21	—	J61
4~6	J12	J22	—	J62
6~8	J13	J23	—	J63
8~10	J14	J24	—	J64
10~12	J15	J25	—	J65
12~14	J16	J26	—	J66
14~16	J17	J27	—	J67
16~18	J18	J28	—	J68
18~20	J19	J29	—	J69

リソース2

塗装工場	P
塗装工場1	P0=1
塗装工場2	P1=1

リソース3

待機場所	T
待機場所1	T0=1
待機場所2	T1=1
待機場所3	T2=1
待機場所4	T3=1
待機場所5	T4=1

リソース4

時間	クレーン C	CR1	CR2	CR3	CR4
1	C10	C20	C30	C40	
2	C11	C21	C31	C41	
3	C12	C22	C32	C42	
4	C13	C23	C33	C43	
5	C14	C24	C34	C44	
6	C15	C25	C35	C45	
7	C16	C26	C36	C46	
8	C17	C27	C37	C47	
9	C18	C28	C38	C48	
10	C19	C29	C39	C49	

リソース5

	職人 W1,W2,W3	溶接職	舩装職
A社	W1A=2	W2A=4	W3A=2
B社	W1B=2	W2B=4	W3B=2

モード

mode(i,j,k,h1,h2,h3)

ブロック

×

作業場所

×

作業職

i

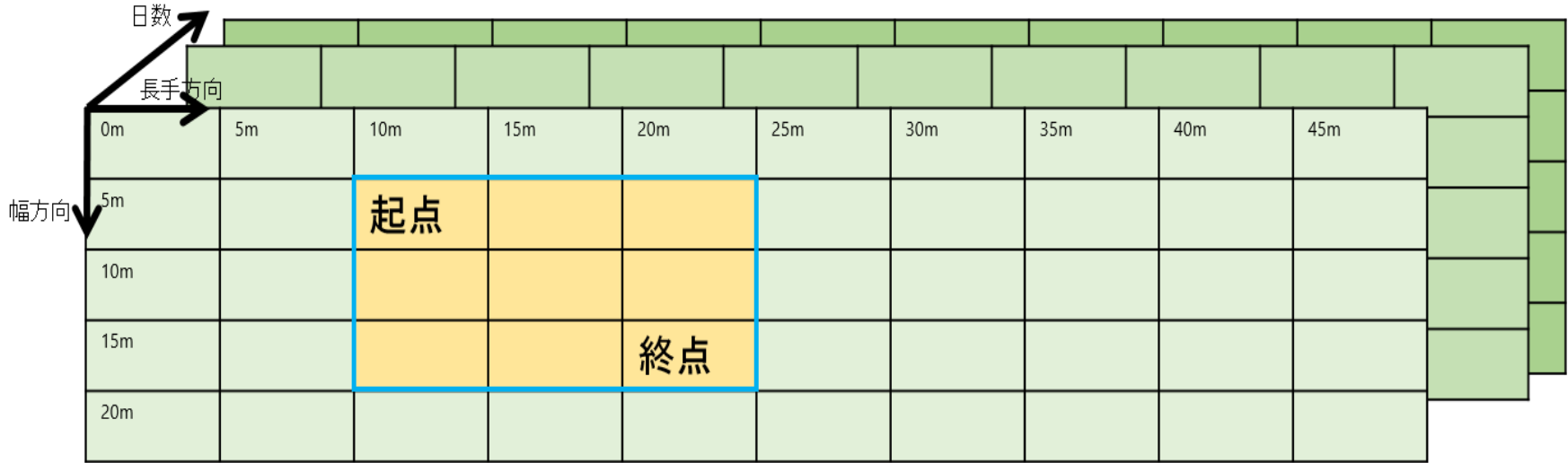
(j,k)

(h1,h2,h3)

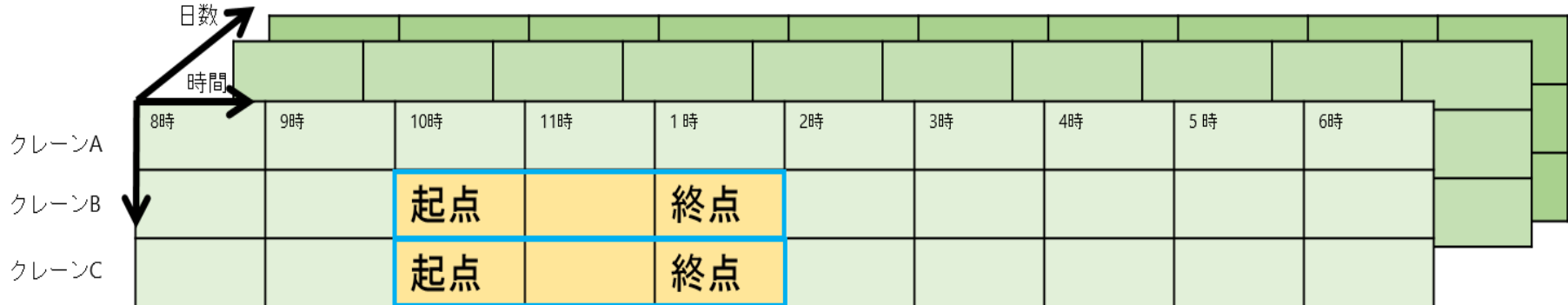
【例題】 個別管理のリソース

●定盤の任意区画使用（定盤計画）

3次元ビンパッキング問題の近似解法



●クレーンの同時使用（時数管理）



【例題】 作業と先行制約

3個のブロックの工程計画問題

No		作業					作業期間			納期		先行制約				
搭載 No	アクティビティ No	船番	ブロック	アクティビティ	作業	作業ID	作業時数	作業人数	作業日数	納期 (順時間)	納期 (逆時間)	後続アクティビティ	後続アクティビティNo (順時間)	CS時差 (順時間)	後続アクティビティNo (逆時間)	CS時差 (逆時間)
1	#1	100	B1	100_B1_取付	取付	1	16	2	1	10	"inf"	100_B1_溶接	2	0	0	0
1	#2	100	B1	100_B1_溶接	溶接	2	96	3	4	10	"inf"	100_B1_艀装	3	-1	1	0
1	#3	100	B1	100_B1_艀装	艀装	3	32	2	2	10	"inf"	100_B1_塗装	4	0	2	-1
1	3	100	B1	100_B1_組立	組立	1, 2, 3	16, 96, 32	2, 3, 2	1, 4, 2	10	"inf"	100_B1_塗表	4	0, -1, 0	0	0, 0, -1
1	4	100	B1	100_B1_塗装	塗装	4	16	2	1	10	"inf"	100_B1_搭載	5	0	3	0
1	5	100	B1	100_B1_搭載	搭載	5	8	1	1	10	5	0	0	0	4	0
2	#6	100	B2	100_B2_取付	取付	1	16	2	1	10	"inf"	100_B2_溶接	7	0	0	0
2	#7	100	B2	100_B2_溶接	溶接	2	96	4	3	10	"inf"	100_B2_艀装	8	-1	6	0
2	#8	100	B2	100_B2_艀装	艀装	3	32	2	2	10	"inf"	100_B2_塗装	9	0	7	-1
2	8	100	B2	100_B2_組立	組立	1, 2, 3	16, 96, 32	2, 4, 2	1, 3, 2	10	"inf"	100_B2_塗表	9	0, -1, 0	0	0, 0, -1
2	9	100	B2	100_B2_塗装	塗装	4	16	2	1	10	"inf"	100_B2_搭載	10	0	8	0
2	10	100	B2	100_B2_搭載	搭載	5	8	1	1	10	5	0	0	0	9	0
3	#11	100	B3	100_B3_取付	取付	1	16	2	1	15	"inf"	100_B3_溶接	12	0	0	0
3	#12	100	B3	100_B3_溶接	溶接	2	32	2	2	15	"inf"	100_B3_搭載	13	0	11	0
3	12	100	B3	100_B3_組立	組立	1, 2	16, 32	2, 2	1, 2	15	"inf"	100_B3_塗表	13	0	0	0
3	13	100	B3	100_B3_搭載	搭載	5	8	1	1	15	0	0	0	0	12	0

ブロック: B1, B2

取付



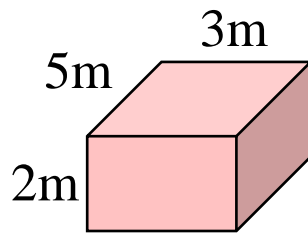
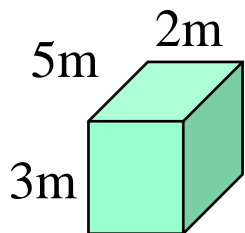
ブロック: B3



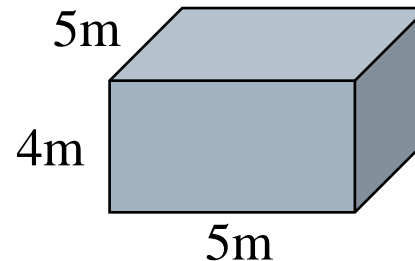
【例題】 作業と資源制約

No		作業					サイズ・重量				作業場所		資源制約 待機場所		作業設備		作業員		
搭載 No	アク ティビ ティ No	船番	ブロック	アクティ ビ ティ	作業	作業ID	長さ L	幅 W	高さ H	重量 T	選択肢	使用量	選択肢	使用量	選択肢 (クレーン、 ゴンドラ、 建屋高さ)	使用量	選択肢 (取付、 溶接、 艀装、 業者)	使用期間	使用量
1	#1	100	B1	100_B1_取付	取付	1	5	2	3	30	J	5,2					W1	1	2
1	#2	100	B1	100_B1_溶接	溶接	2	5	2	3	30	J	5,2					W2	4	3
1	#3	100	B1	100_B1_艀装	艀装	3	5	2	3	30	J	5,2			H	3	W3	2	2
1	3	100	B1	100_B1_組立	組立	1,2,3	5	2	3	30	J	5,2			H	3	W1,W2,W3	1,4,2	2,3,2
1	4	100	B1	100_B1_塗装	塗装	4	5	2	3	30	P	1	T	5,2					
1	5	100	B1	100_B1_搭載	搭載	5	5	2	3	30	D	1	T	5,2	C	2[1,2,3]			
2	#6	100	B2	100_B2_取付	取付	1	5	3	2	30	J	5,3					W1	1	2
2	#7	100	B2	100_B2_溶接	溶接	2	5	3	2	30	J	5,3					W2	3	4
2	#8	100	B2	100_B2_艀装	艀装	3	5	3	2	30	J	5,3			H	2	W3	2	2
2	8	100	B2	100_B2_組立	組立	1,2,3	5	3	2	30	J	5,3			H	2	W1,W2,W3	1,3,2	2,4,2
2	9	100	B2	100_B2_塗装	塗装	4	5	3	2	30	P	1	T	5,3					
2	10	100	B2	100_B2_搭載	搭載	5	5	3	2	30	D	1	T	5,3	C	3[1,2,4]			
3	#11	100	B3	100_B3_取付	取付	1	5	5	4	100	J	5,5					W1	1	2
3	#12	100	B3	100_B3_溶接	溶接	2	5	5	4	100	J	5,5			H	4	W2	2	2
3	12	100	B3	100_B3_組立	組立	1,2	5	5	4	100	J	5,5			H	4	W1,W2	1,2	2,2
3	13	100	B3	100_B3_搭載	搭載	5	5	5	4	100	D	1	T	5,5	C	2[3,4]			

ブロック: B1, B2



ブロック: B3



【解法】 データ作成(順時間左詰め)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
アクティビティNo	アクティビティ	作業ID	作業日数	納期(順時間)	後続アクティビティNo(順時間)	CS時差(順時間)	作業場所選択肢	作業場所使用量	待機場所選択肢	待機場所使用量	選択肢(クレーン、ゴンドラ、建屋高さ)	作業設備使用量	作業設備選択肢(取付、溶接、機装;業者)	作業員使用期間	作業員使用量	コスト
#1	100_B1_取付	1	1	10	2	0	J	5,2	0	0	0	0	W1	1	2	1
#2	100_B1_溶接	2	4	10	3	-1	J	5,2	0	0	0	0	W2	4	3	1
#3	100_B1_機装	3	2	10	4	0	J	5,2	0	0	H	3	W3	2	2	1
3	100_B1_組立	1,2,3	1,4,2	10	4	0,-1,0	J	5,2	0	0	H	3	W1,W2,W3	1,4,2	2,3,2	1
4	100_B1_塗装	4	1	10	5	0	P	1	T	5,2	0	0	0	0	0	0
5	100_B1_搭載	5	1	10	0	0	D	1	T	5,2	C	2[1,2,3]	0	0	0	0
#6	100_B2_取付	1	1	10	7	0	J	5,3	0	0	0	0	W1	1	2	1
#7	100_B2_溶接	2	3	10	8	-1	J	5,3	0	0	0	0	W2	3	4	1
#8	100_B2_機装	3	2	10	9	0	J	5,3	0	0	H	2	W3	2	2	1
8	100_B2_組立	1,2,3	1,3,2	10	9	0,-1,0	J	5,3	0	0	H	2	W1,W2,W3	1,3,2	2,4,2	1
9	100_B2_塗装	4	1	10	10	0	P	1	T	5,3	0	0	0	0	0	0
10	100_B2_搭載	5	1	10	0	0	D	1	T	5,3	C	3[1,2,4]	0	0	0	0
#11	100_B3_取付	1	1	15	12	0	J	5,5	0	0	0	0	W1	1	2	1
#12	100_B3_溶接	2	2	15	13	0	J	5,5	0	0	H	4	W2	2	2	1
12	100_B3_組立	1,2	1,2	15	13	0	J	5,5	0	0	H	4	W1,W2	1,2	2,2	1
13	100_B3_搭載	5	1	15	0	0	D	1	T	5,5	C	2[3,4]	0	0	0	0

【解法】 プログラム(順時間左詰め)

```

from optseq import *
bp=Model()
#====リソース
J=[[ (0,0), (0,1), (0,2), (0,3), (0,4), (0,5), (0,6), (0,7), (0,8), (0,9) ], ¥
  [ (1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (1,5), (1,6), (1,7), (1,8), (1,9) ], ¥
  [ (2,0), (2,1), (2,2), (2,3), (2,4), (2,5), (2,6), (2,7), (2,8), (2,9) ], ¥
  [ (3,0), (3,1), (3,2), (3,3), (3,4), (3,5), (3,6), (3,7), (3,8), (3,9) ], ¥
  [ (4,0), (4,1), (4,2), (4,3), (4,4), (4,5), (4,6), (4,7), (4,8), (4,9) ], ¥
  [ (5,0), (5,1), (5,2), (5,3), (5,4), (5,5), (5,6), (5,7), (5,8), (5,9) ]]
T=[0,1,2,3,4]
H=[2,2,3,3,4]
P=[0,1]
D=[0]
C=[[ (0,0), (0,1), (0,2), (0,3), (0,4), (0,5), (0,6), (0,7), (0,8), (0,9) ], ¥
  [ (1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (1,5), (1,6), (1,7), (1,8), (1,9) ], ¥
  [ (2,0), (2,1), (2,2), (2,3), (2,4), (2,5), (2,6), (2,7), (2,8), (2,9) ], ¥
  [ (3,0), (3,1), (3,2), (3,3), (3,4), (3,5), (3,6), (3,7), (3,8), (3,9) ]]
W1=[10,11]
W2=[20,21]
W3=[30,31]
#-----
resJ={}
for i in range(0,6):
    for j in range(0,10):
        resJ[i,j] =bp.addResource("J{0}{1}".format(i,j), capacity={(0,"inf"):1})
#-----
resT={}
for i in range(0,5):
    resT[i] =bp.addResource("T{0}".format(i), capacity={(0,"inf"):1})
#-----
resH={}
for i in range(0,10):
    resH[i] =bp.addResource("H{0}".format(i), capacity={(0,"inf"):H[i]})
#-----
resP={}
for i in range(0,2):
    resP[i] =bp.addResource("P{0}".format(i), capacity={(0,"inf"):1})
#-----
resC={}
for i in range(0,4):
    for j in range(0,10):
        resC[i,j] =bp.addResource("C{0}{1}".format(i,j), capacity={(0,"inf"):1})

```

J: 組立定盤(6m × 50m, 6 × 10区画)
T: 待機場所(5区画)
P: ブラスト・塗装工場(2棟)
D: ドック(3個)
C: クレーン(4台, 10時間)
W1: 取付職(A班:2名, B班:2名)
W2: 溶接職(A班:4名, B班:4名)
W3: 艀装職(A班:2名, B班:2名)

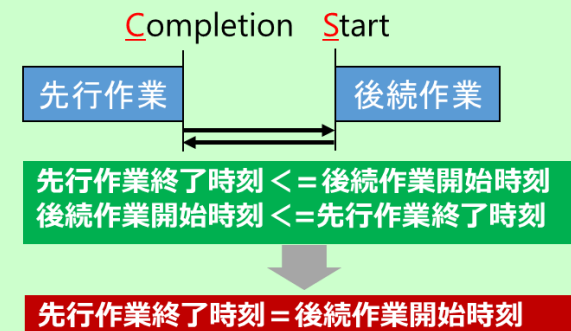
【解法】 プログラム(順時間左詰め)

```

#-----
resW1={}
resW1[10] =bp.addResource("W1A", capacity={(0,"inf"):2})
resW1[11] =bp.addResource("W1B", capacity={(0,"inf"):2})
#-----
resW2={}
resW2[20] =bp.addResource("W2A", capacity={(0,"inf"):4})
resW2[21] =bp.addResource("W2B", capacity={(0,"inf"):4})
#-----
resW3={}
resW3[30] =bp.addResource("W3A", capacity={(0,"inf"):2})
resW3[31] =bp.addResource("W3B", capacity={(0,"inf"):2})
#====基礎データ
#i:["0:name", 1:job, 2:dur, 3:due, 4:prec, 5:CS, 6:J, 7:J', 8:T, 9:T', 10:C, 11:C', 12:H, 13:H', 14:H''],¥
data={
#1:["100_B1_取付",[1],[1], 10, [2],[0], J, [5, 2], 0, [0], 0, {0},[W1],[1],[2]],¥
#2:["100_B1_溶接",[2],[4], 10, [3],[-1], J, [5, 2], 0, [0], 0, {0},[W2],[4],[3]],¥
#3:["100_B1_艤装",[3],[2], 10, [4],[0], J, [5, 2], 0, [0], H, {3},[W3],[2],[2]],¥
3:["100_B1_組立",[1, 2, 3],[1, 4, 2], 10, [4],[0], J, [5, 2], 0, [0], H, {3},[W1,W2,W3],[1, 4, 2],[2, 3, 2]],¥
4:["100_B1_塗装",[4],[1], 10, [5],[0], P, [1], T, [5, 2], 0, {0},[0],[0],[0]],¥
5:["100_B1_搭載",[5],[1], 10, [0],[0], 0, [1], T, [5, 2], C, {2:[1, 2, 3]],[0],[0],[0]],¥
#6:["100_B2_取付",[1],[1], 10, [7],[0], J, [5, 3], 0, [0], 0, {0},[W1],[1],[2]],¥
#7:["100_B2_溶接",[2],[3], 10, [8],[-1], J, [5, 3], 0, [0], 0, {0},[W2],[3],[4]],¥
#8:["100_B2_艤装",[3],[2], 10, [9],[0], J, [5, 3], 0, [0], H, {2},[W3],[2],[2]],¥
8:["100_B2_組立",[1, 2, 3],[1, 3, 2], 10, [9],[0], J, [5, 3], 0, [0], H, {2},[W1,W2,W3],[1, 3, 2],[2, 4, 2]],¥
9:["100_B2_塗装",[4],[1], 10, [10],[0], P, [1], T, [5, 3], 0, {0},[0],[0],[0]],¥
10:["100_B2_搭載",[5],[1], 10, [0],[0], 0, [1], T, [5, 3], C, {3:[1, 2, 4]],[0],[0],[0]],¥
#11:["100_B3_取付",[1],[1], 15, [12],[0], J, [5, 5], 0, [0], 0, {0},[W1],[1],[2]],¥
#12:["100_B3_溶接",[2],[2], 15, [13],[0], J, [5, 5], 0, [0], H, {4},[W2],[2],[2]],¥
12:["100_B3_組立",[1, 2],[1, 2], 15, [13],[0], J, [5, 5], 0, [0], H, {4},[W1,W2],[1, 2],[2, 2]],¥
13:["100_B3_搭載",[5],[1], 15, [0],[0], 0, [1], T, [5, 5], C, {2:[3, 4]],[0],[0],[0]],¥
}
#====作業
act={}
for i in data:
    #納期設定
    act[i]=bp.addActivity(data[i][0],duedate=data[i][3])
#====先行関係
for i in data:
    if not data[i][4]==[0]:
        #次作業が搭載(終端)でなければ先行関係を定義
        for j in range(0,len(data[i][4])):
            bp.addTemporal(act[i],act[data[i][4][j]],tempType="CS",delay= data[i][5][j])
#====納期日
for i in data:
    if data[i][1]==[5]:
        #現作業が搭載ならば納期を実日程に固定
        bp.addTemporal("source",act[i],"SS",delay= data[i][3])
        bp.addTemporal(act[i],"source","SS",delay=-data[i][3])

```

Data[0]: アクティビティ名
 Data[1]: 作業ID
 Data[2]: 作業時間
 Data[3]: 納期
 Data[4]: 先行関係
 Data[5]: CS-delay
 Data[6]: 作業場所
 Data[7]: ブロックサイズ
 Data[8]: 待機場所
 Data[9]: ブロックサイズ
 Data[10]: クレーン
 Data[11]: クレーン稼働時間
 Data[12]: 職種
 Data[13]: 作業期間
 Data[14]: 作業員数



【解法】 プログラム(順時間左詰め)

```

#====作業モードとリソース割当
mode={}
for i in data:
#-----作業場所(組立定盤) resJ
    if data[i][6]==J:
        for j in range(0,len(J[0])-data[i][7][0]): #長方向の定盤選択
            for k in range(0,len(J)-data[i][7][1]): #幅方向の定盤選択
                for h1 in W1: #作業職人(取付、業者A,B)
                    for h2 in W2: #作業職人(溶接、業者A,B)
                        for h3 in W3: #作業職人(艀装、業者A,B)
                            mode[i,j,k,h1,h2,h3]=Mode("mode[{0:03d}1][{1}_{2}][{3}_{4}_{5}]"
                                .format(i,j,k,h1,h2,h3),duration=sum(data[i][2]))
                            for s in range(0,data[i][7][0]): #ブロック長の定盤確保
                                for t in range(0,data[i][7][1]):#ブロック幅の定盤確保
                                    mode[i,j,k,h1,h2,h3].addResource(resJ[k+t,j+s],{(0,sum(data[i][2])):1})
                                    mode[i,j,k,h1,h2,h3].addResource(resH[j+s],{(0,sum(data[i][2])):2})
                                    for jj in range(j+data[i][7][0],len(J[0])):
                                        mode[i,j,k,h1,h2,h3].addResource(resH[jj],{(sum(data[i][2])-1,sum(data[i][2])):2})
                            if W1 in data[i][12]:
                                mode[i,j,k,h1,h2,h3].addResource(resW1[h1],{(0,data[i][2][0]):data[i][14][0]})
                            if W2 in data[i][12]:
                                mode[i,j,k,h1,h2,h3].addResource(resW2[h2],{(data[i][2][0],data[i][2][0]+data[i][2][1]):data[i][14][1]})
                            if W3 in data[i][12]:
                                mode[i,j,k,h1,h2,h3].addResource(resW3[h3],{(data[i][2][0]+data[i][2][1],data[i][2][0]+data[i][2][1]+data[i][2][2]):data[i][14][2]})
                            act[i].addModes(mode[i,j,k,h1,h2,h3])
#-----作業場所(塗装工場) resP
    if data[i][6]==P:
        for j in range(0,len(P)):
            mode[i,j]=Mode("mode[{0:03d}1][{1}]"
                .format(i,j),duration=data[i][2][0])
            mode[i,j].addResource(resP[j],{(0,data[i][2][0]):1})
            act[i].addModes(mode[i,j])
#-----作業場所(ドック) resD
    if data[i][6]==0:
        if not data[i][11]==0:
            for time in data[i][11]:
                for j in range(0,10-time): #開始時間
                    mode[i,j]=Mode("mode[{0:03d}1][{1}]"
                        .format(i,j),duration=1)
                    for s in range(0,time): #稼働時間
                        for k in data[i][11][time]:
                            mode[i,j].addResource(resC[k-1,j+s],{(0,1):1})
            act[i].addModes(mode[i,j])

```

Mode[i,j,k,h1,h2,h3]

i: アクティビティ番号(組立)

j: 定盤使用開始区画(長さ)

k: 定盤使用開始区画(幅)

h1: 取付班

h2: 溶接班

h3: 艀装班

Mode[i,j]

i: アクティビティ番号(塗装)

j: 塗装建屋番号

Mode[i,j]

i: アクティビティ番号(搭載)

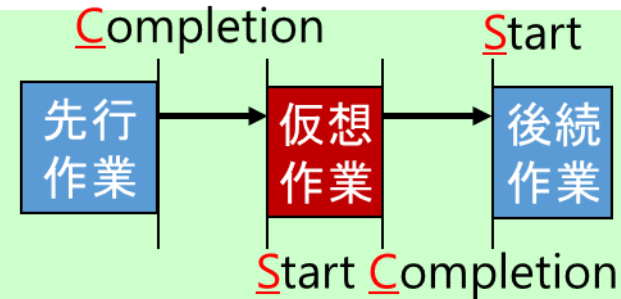
j: クレーン開始時間

【解法】 プログラム(順時間左詰め)

```

#====待機場所(塗装前、搭載前) resT
d_act={}
d_mode={}
for i in data:
    if data[i][1]==[4] or data[i][1]==[5]:
        d_act[i]=bp.addActivity("act[{0:03d}]待機".format(i))
        for j in range(0,len(data[i][8])):
            d_mode[i,j]=Mode("mode[{0:03d}0][{1}]" .format(i,j))
            d_mode[i,j].addBreak(0,0)
            d_mode[i,j].addResource(resT[j],{(0,"inf"):1},"break")
            d_act[i].addModes(d_mode[i,j])
        bp.addTemporal(act[i-1],d_act[i],tempType="CS")
        bp.addTemporal(d_act[i],act[i-1],tempType="SC")
        bp.addTemporal(d_act[i],act[i],tempType="CS")
        bp.addTemporal(act[i],d_act[i],tempType="SC")
#====再生不能資源によるモード等価制約
n_res={}
for i in data:
    if data[i][6]==J and data[i+1][6]==J:
        for j in range(0,len(J[0])-data[i][7][0]):
            for k in range(0,len(J)-data[i][7][1]):
                for h1 in W1:
                    for h2 in W2:
                        for h3 in W3:
                            n_res[i,j,k,h1,h2,h3]= bp.addResource("constraint[{0}_{1}_{2}]" .format(i,j,k),rhs=0,direction="=")
                            n_res[i,j,k,h1,h2,h3].addTerms(1,act[i],mode[i,j,k,h1,h2,h3])
                            n_res[i,j,k,h1,h2,h3].addTerms(-1,act[i+1],mode[i+1,j,k,h1,h2,h3])
#====求解
bp.Params.TimeLimit=1
bp.Params.OutputFlag=True
bp.Params.Makespan=True
bp.optimize()
bp.writeExcel("bp(W300129a).csv")
bp.write("bp(W300129a).txt")

```



待機を仮想作業として待機時間を自動設定

定盤での組立作業は
同一モードを選択

【結果】 搬出高さ制限（順時間左詰め）

H0	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
H1	3	3	3	3	3	3	5	5	3	3	3	5	5	5	5	5	0
H2	3	3	3	3	3	3	5	5	3	3	3	5	5	5	5	5	0
H3	3	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	0
H4	3	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	0
H5	5	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	0
H6	5	3	3	3	3	1	3	3	5	5	3	5	5	5	5	5	0
H7	5	3	3	3	3	1	3	3	5	5	3	5	5	5	5	5	0
H8	5	5	5	5	5	3	5	3	5	5	3	5	5	5	5	5	0
H9	5	5	5	5	5	3	5	3	5	5	3	5	5	5	5	5	0

【結果】 クレーン使用状況(順時間左詰)

C00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
C01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
C02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
C03	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C04	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C05	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C06	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C07	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C08	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C09	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
C26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
C27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C33	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C34	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
C35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
C36	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
C37	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C38	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
C39	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	

使用クレーン **B1**:C1, C2, C3 ⇒2時間
 使用クレーン **B2**:C1, C2, C4 ⇒3時間
 使用クレーン **B3**:C3, C4 ⇒2時間

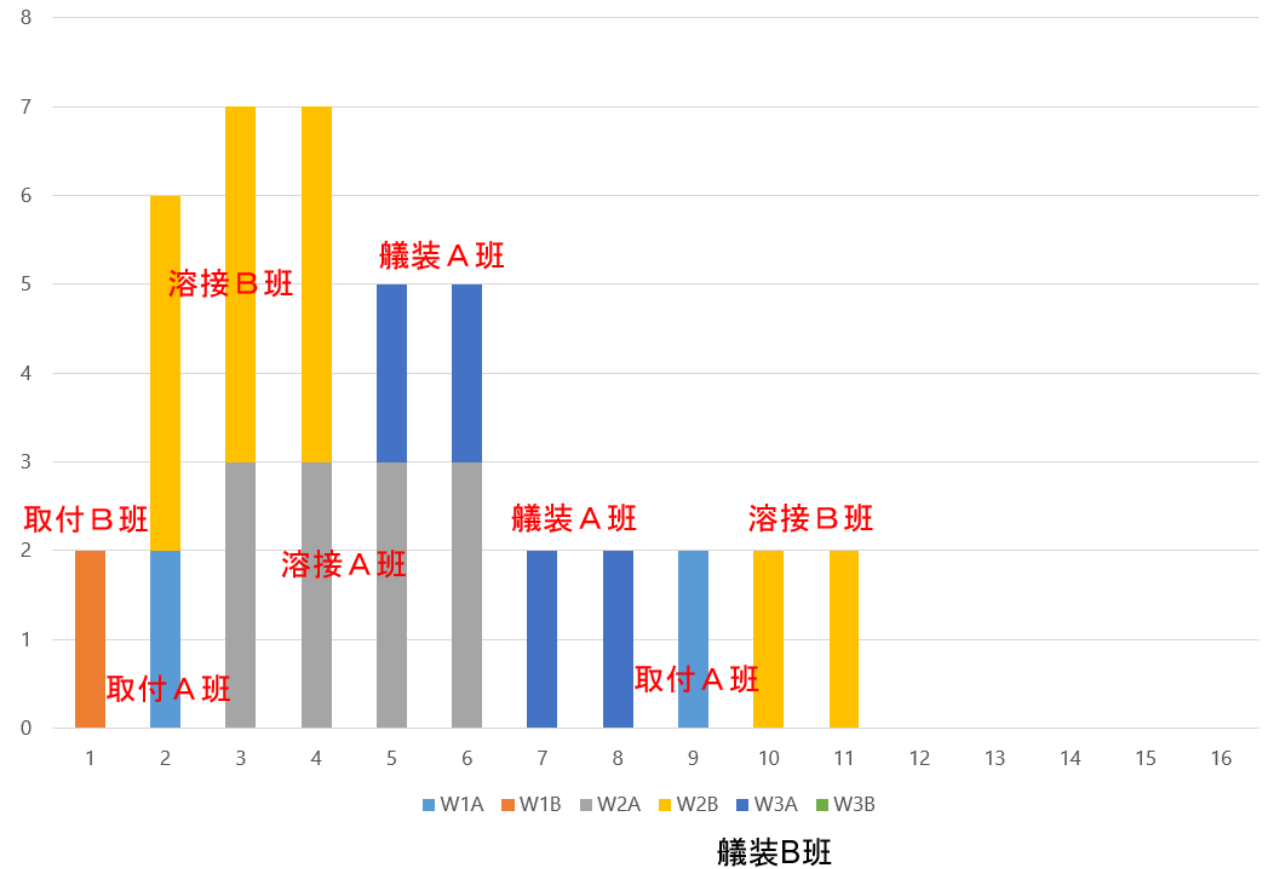


B3

	11日目				16日目				
11	C00	C10	C20	C30	16	C00	C10	C20	C30
	C01	C11	C21	C31		C01	C11	C21	C31
	C02	C12	C22	C32		C02	C12	C22	C32
	C03	C13	C23	C33		C03	C13	C23	C33
	C04	C14	C24	C34		C04	C14	C24	C34
	C05	C15	C25	C35		C05	C15	C25	C35
	C06	C16	C26	C36		C06	C16	C26	C36
	C07	C17	C27	C37		C07	C17	C27	C37
	C08	C18	C28	C38		C08	C18	C28	C38
	C09	C19	C29	C39		C09	C19	C29	C39

【結果】 配員状況(順時間左詰め)

	W1A	W1B	W2A	W2B	W3A	W3B
1	0	2	0	0	0	0
2	2	0	0	4	0	0
3	0	0	3	4	0	0
4	0	0	3	4	0	0
5	0	0	3	0	2	0
6	0	0	3	0	2	0
7	0	0	0	0	2	0
8	0	0	0	0	2	0
9	2	0	0	0	0	0
10	0	0	0	2	0	0
11	0	0	0	2	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0



【解法】 データ作成 (逆時間左詰め)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
アクティビティNo	アクティビティ	作業ID	作業日数	納期 (逆時間)	後続アクティビティNo (逆時間)	CS時差 (逆時間)	作業場所選択肢	作業場所使用量	待機場所選択肢	待機場所使用量	選択肢 (クレーン、ゴンドラ、建屋高さ)	作業設備使用量	作業設備選択肢 (取付、溶接、鑷装; 業者)	作業員使用期間	作業員使用量	
#1	100_B1_取付	1	1	"inf"	0	0	J	5,2	0	0	0	0	W1	1	2	¥
#2	100_B1_溶接	2	4	"inf"	1	0	J	5,2	0	0	0	0	W2	4	3	¥
#3	100_B1_鑷装	3	2	"inf"	2	-1	J	5,2	0	0	H	3	W3	2	2	¥
3	100_B1_組立	1,2,3	1,4,2	"inf"	0	0,0,-1	J	5,2	0	0	H	3	W1,W2,W3	1,4,2	2,3,2	¥
4	100_B1_塗装	4	1	"inf"	3	0	P	1	T	5,2	0	0	0	0	0	¥
5	100_B1_搭載	5	1	5	4	0	D	1	T	5,2	C	2[1,2,3]	0	0	0	¥
#6	100_B2_取付	1	1	"inf"	0	0	J	5,3	0	0	0	0	W1	1	2	¥
#7	100_B2_溶接	2	3	"inf"	6	0	J	5,3	0	0	0	0	W2	3	4	¥
#8	100_B2_鑷装	3	2	"inf"	7	-1	J	5,3	0	0	H	2	W3	2	2	¥
8	100_B2_組立	1,2,3	1,3,2	"inf"	0	0,0,-1	J	5,3	0	0	H	2	W1,W2,W3	1,3,2	2,4,2	¥
9	100_B2_塗装	4	1	"inf"	8	0	P	1	T	5,3	0	0	0	0	0	¥
10	100_B2_搭載	5	1	5	9	0	D	1	T	5,3	C	3[1,2,4]	0	0	0	¥
#11	100_B3_取付	1	1	"inf"	0	0	J	5,5	0	0	0	0	W1	1	2	¥
#12	100_B3_溶接	2	2	"inf"	11	0	J	5,5	0	0	H	4	W2	2	2	¥
12	100_B3_組立	1,2	1,2	"inf"	0	0	J	5,5	0	0	H	4	W1,W2	1,2	2,2	¥
13	100_B3_搭載	5	1	0	12	0	D	1	T	5,5	C	2[3,4]	0	0	0	¥

【解法】 プログラム(逆時間左詰め)

```

from optseq import *
bp=Model()
#====リソース
#====基礎データ
#i:["0:name", 1:job, 2:dur, 3:due, 4:prec, 5:CS, 6:J, 7:J', 8:T, 9:T', 10:C, 11:C', 12:H, 13:H', 14:H'],¥
data={
#1:["100_B1_取付", [1],[1], 10, [2],[0], J, [5, 2], 0, [0], 0, {0},[W1],[1],[2]],¥
#2:["100_B1_溶接", [2],[4], 10, [3],[-1], J, [5, 2], 0, [0], 0, {0},[W2],[4],[3]],¥
#3:["100_B1_艀装", [3],[2], 10, [4],[0], J, [5, 2], 0, [0], H, {3},[W3],[2],[2]],¥
#4:["100_B1_組立", [1, 2, 3],[1, 4, 2], 10, [4],[0], J, [5, 2], 0, [0], H, {3},[W1,W2,W3],[1, 4, 2],[2, 3, 2]],¥
#5:["100_B1_塗装", [4],[1], 10, [5],[0], P, [1], T, [5, 2], 0, {0},[0],[0],[0]],¥
#6:["100_B1_搭載", [5],[1], 10, [0],[0], 0, [1], T, [5, 2], C, {2:[1, 2, 3]],[0],[0],[0]],¥
#7:["100_B2_取付", [1],[1], 10, [7],[0], J, [5, 3], 0, [0], 0, {0},[W1],[1],[2]],¥
#8:["100_B2_溶接", [2],[3], 10, [8],[-1], J, [5, 3], 0, [0], 0, {0},[W2],[3],[4]],¥
#9:["100_B2_艀装", [3],[2], 10, [9],[0], J, [5, 3], 0, [0], H, {2},[W3],[2],[2]],¥
#10:["100_B2_組立", [1, 2, 3],[1, 3, 2], 10, [9],[0], J, [5, 3], 0, [0], H, {2},[W1,W2,W3],[1, 3, 2],[2, 4, 2]],¥
#11:["100_B2_塗装", [4],[1], 10, [10],[0], P, [1], T, [5, 3], 0, {0},[0],[0],[0]],¥
#12:["100_B2_搭載", [5],[1], 10, [0],[0], 0, [1], T, [5, 3], C, {3:[1, 2, 4]],[0],[0],[0]],¥
#13:["100_B3_取付", [1],[1], 15, [12],[0], J, [5, 5], 0, [0], 0, {0},[W1],[1],[2]],¥
#14:["100_B3_溶接", [2],[2], 15, [13],[0], J, [5, 5], 0, [0], H, {4},[W2],[2],[2]],¥
#15:["100_B3_組立", [1, 2],[1, 2], 15, [13],[0], J, [5, 5], 0, [0], H, {4},[W1,W2],[1, 2],[2, 2]],¥
#16:["100_B3_搭載", [5],[1], 15, [0],[0], 0, [1], T, [5, 5], C, {2:[3, 4]],[0],[0],[0]],¥
}
#====作業
#====先行関係
#====納期日
#====作業モードとリソース割当
#-----作業場所(組立定盤) resJ
for jj in range(j+data[i][7][0], len(J[0])):
    mode[i,j,k,h1,h2,h3].addResource(resH[jj],{(sum(data[i][2])-1, sum(data[i][2])):2})
    if W1 in data[i][12]:
        mode[i,j,k,h1,h2,h3].addResource(resW1[h1],{(0, data[i][2][0]):data[i][14][0]})
    if W2 in data[i][12]:
        mode[i,j,k,h1,h2,h3].addResource(resW2[h2],{(data[i][2][0], data[i][2][0]+data[i][2][1]):data[i][14][1]})
    if W3 in data[i][12]:
        mode[i,j,k,h1,h2,h3].addResource(resW3[h3],{(data[i][2][0]+data[i][2][1], data[i][2][0]+data[i][2][1]+data[i][2][2]):data[i][14][2]})
    act[i].addModes(mode[i,j,k,h1,h2,h3])
#-----作業場所(塗装工場) resP
#-----作業場所(ドック) resD
#====待機場所(塗装前、搭載前) resT
    bp.addTemporal(act[i-1], d_act[i], tempType="CS")
    bp.addTemporal(d_act[i], act[i-1], tempType="SC")
    bp.addTemporal(d_act[i], act[i], tempType="CS")
    bp.addTemporal(act[i], d_act[i], tempType="SC")
#====再生不能資源によるモード等価制約
#====求解
bp.writeExcel("bp(W300129b).csv")
bp.write("bp(W300129b).txt")

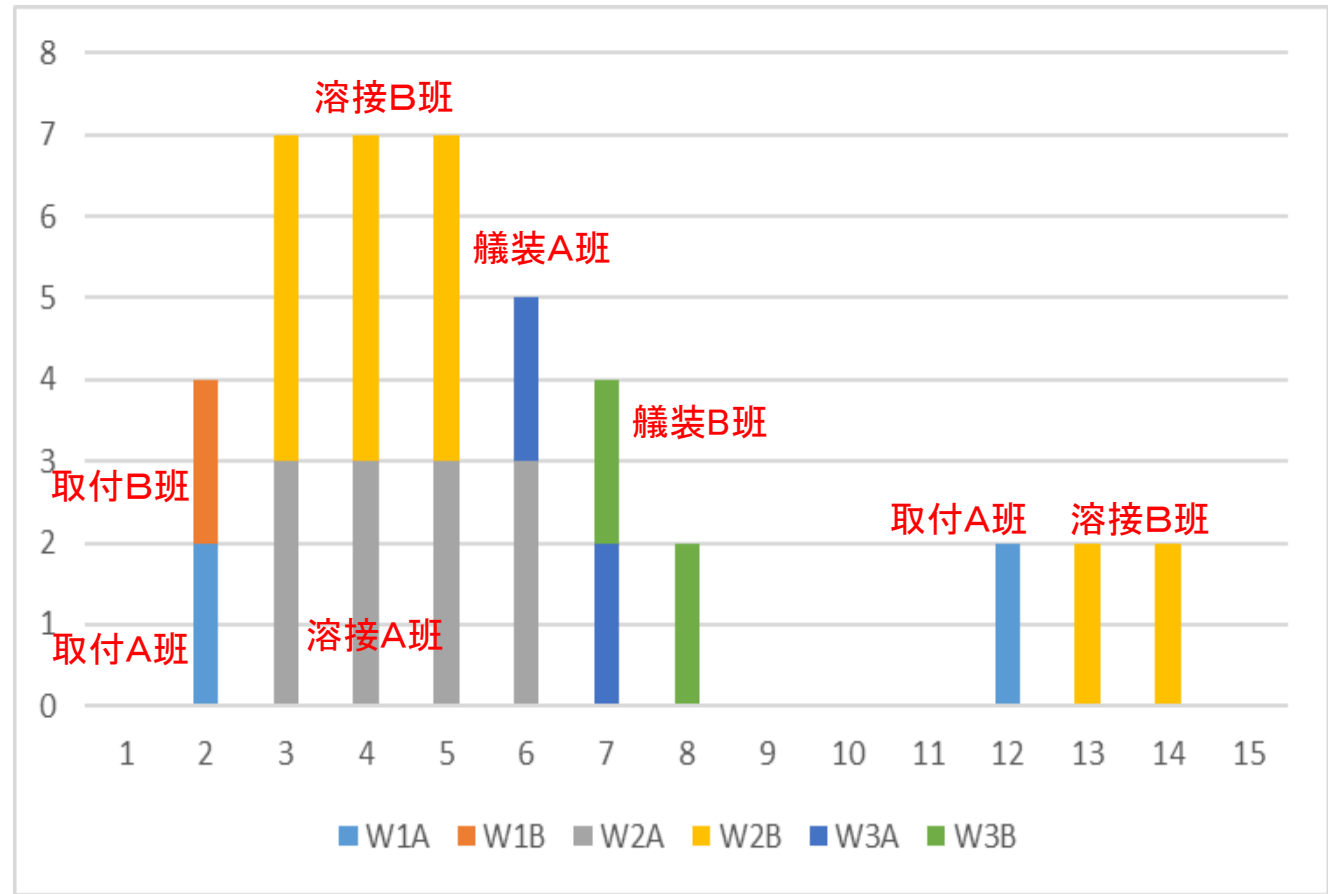
```


【結果】 搬出高さ制限（逆時間左詰め）

H0		5	5	5	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5
H1		5	3	3	3	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	3	3	3	5
H2		5	3	3	3	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	3	3	3	5
H3		5	3	3	3	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	3	3	3	5
H4		5	3	3	3	5	5	5	3	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	3	5	5	5	3	3	3	5
H5		5	3	3	3	5	5	5	3	1	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	1	3	5	5	5	3	3	3	5
H6		5	3	5	5	5	5	5	3	1	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	1	3	5	5	5	5	5	3	5
H7		5	3	5	5	5	5	5	3	1	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	1	3	5	5	5	5	5	3	5
H8		5	3	5	5	5	5	5	3	1	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	1	3	5	5	5	5	5	3	5
H9		5	3	5	5	5	5	5	3	3	5	5	5	5	5	0	0	5	5	5	5	5	3	3	5	5	5	5	5	3	5

【結果】 配員状況(逆時間左詰め)

	W1A	W1B	W2A	W2B	W3A	W3B
1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	0	0	0	0
3	0	0	3	4	0	0
4	0	0	3	4	0	0
5	0	0	3	4	0	0
6	0	0	3	0	2	0
7	0	0	0	0	2	2
8	0	0	0	0	0	2
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	2	0	0	0	0	0
13	0	0	0	2	0	0
14	0	0	0	2	0	0
15	0	0	0	0	0	0

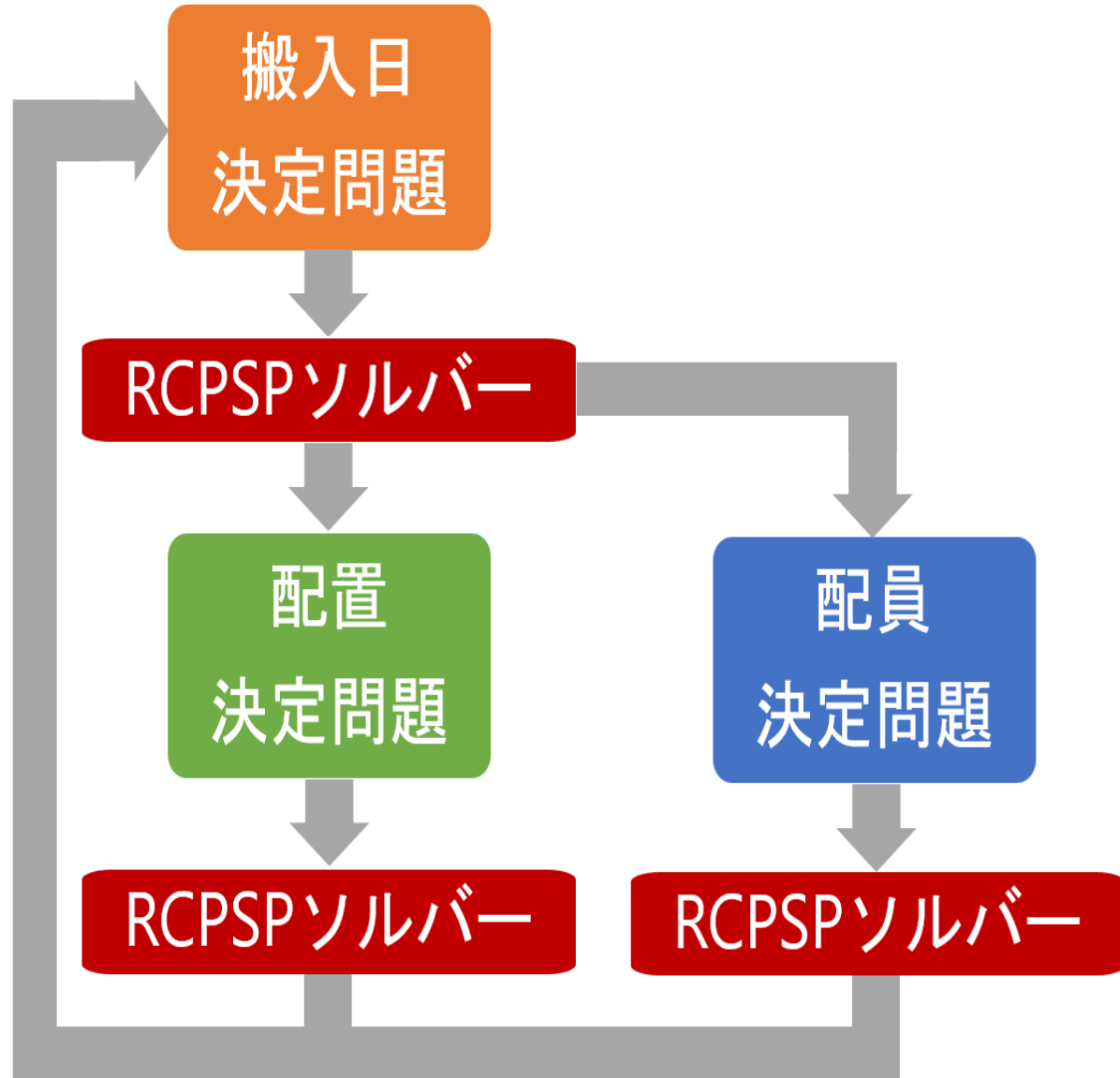
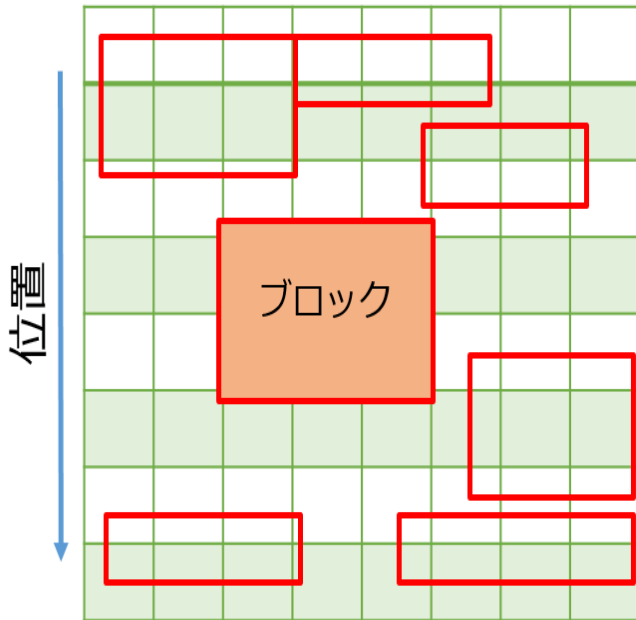


野々部宏司先生らによる研究(1999)

野々部・茨木：
「資源制約付きスケジューリング問題の
定式化と近似解法」
数理解析研究所講究録(1999)

矩形埋込問題

日程



慶田君修論(2018)

入力データ上のボタンを押して実行

No	代表ブロック	ブロック	ステージ	作業ID	ブロック	ステージ	作業	クレーン使用	完了遅延	連続	PS同	相対指	L	B	D
1	DB1	DB1	大組	A1	DB1	艦装	AA		2				16.7	21.8	2
2	DB1	DB1	艦装	AA	DB1	屋外	C5	○	0				16.7	21.8	2
3	DB1	DB1	屋外	C5	DB1	塗装	P1	○	0				16.7	21.8	2
4	DB1	DB1	塗装	P1	DB1	搭載	搭載	○	0				16.7	21.8	2
5	DB1	DB1	搭載	搭載					0			1	16.7	21.8	2
6	DB2	DB2S	大組	A1	DB2S	艦装	AA		2				17.2	14.9	2
7	DB2	DB2S	艦装	AA	DB2X	屋外	C5	○	0				17.2	14.9	2

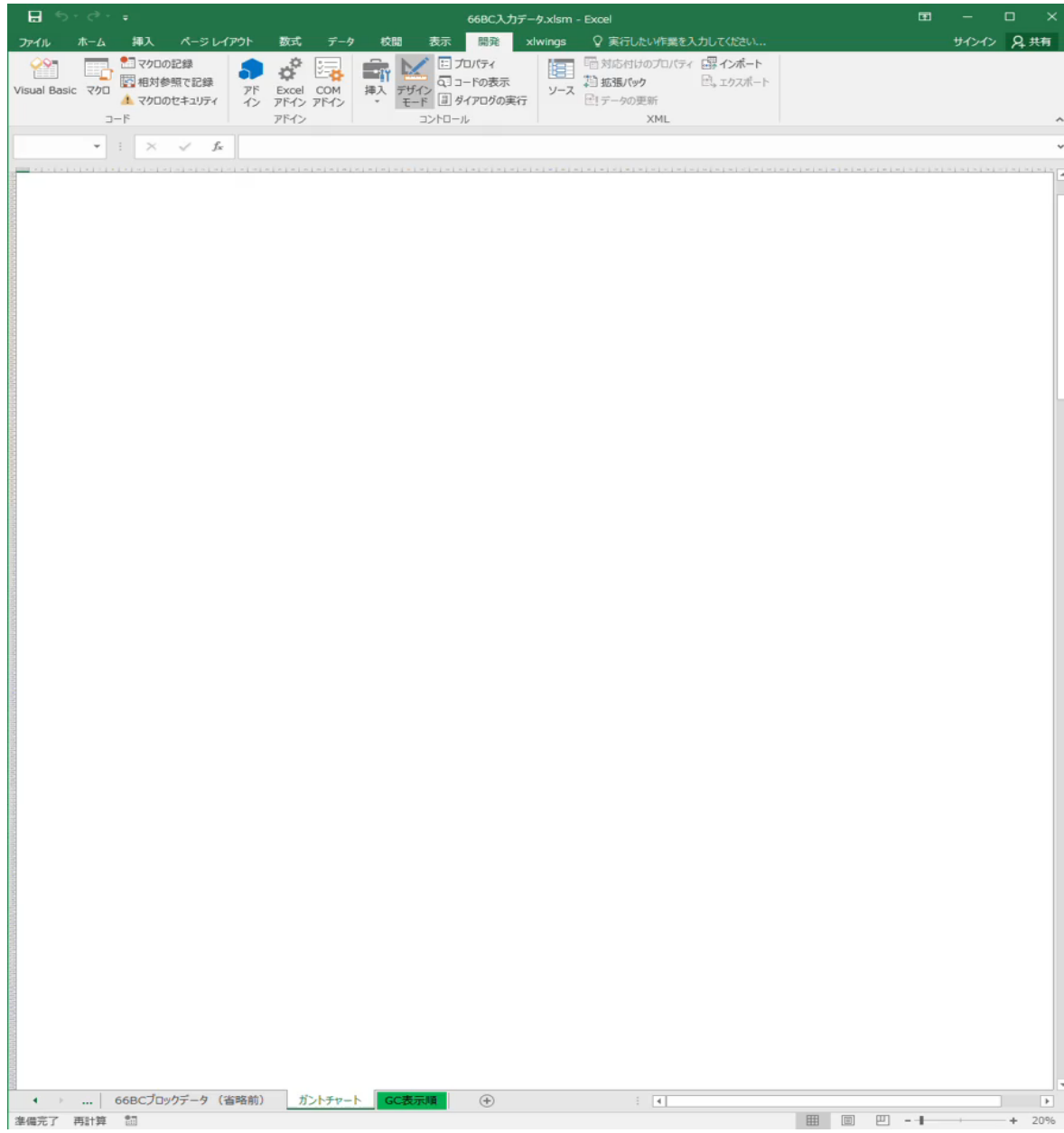
Pythonプログラムによる読み込み, OptSeqの文法でRCPSPとしてモデル化

OptSeqによる求解

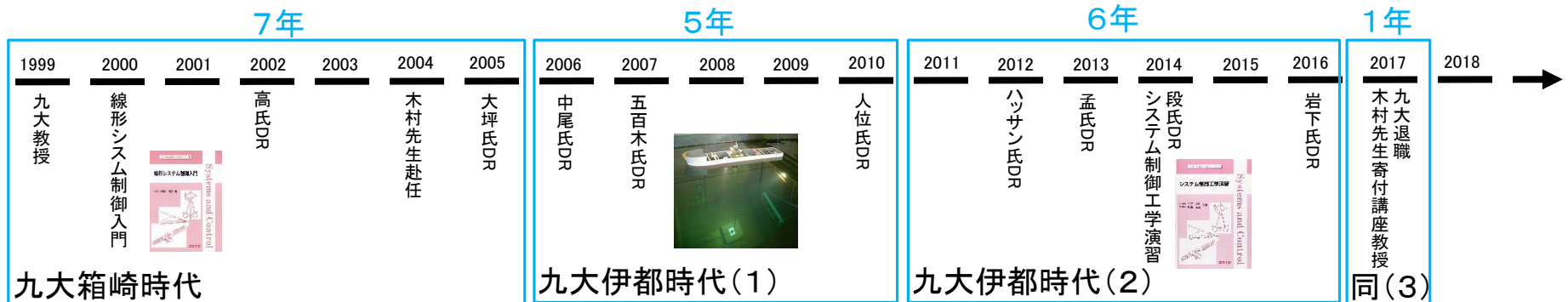
自動

結果の読み込み, 図表出力

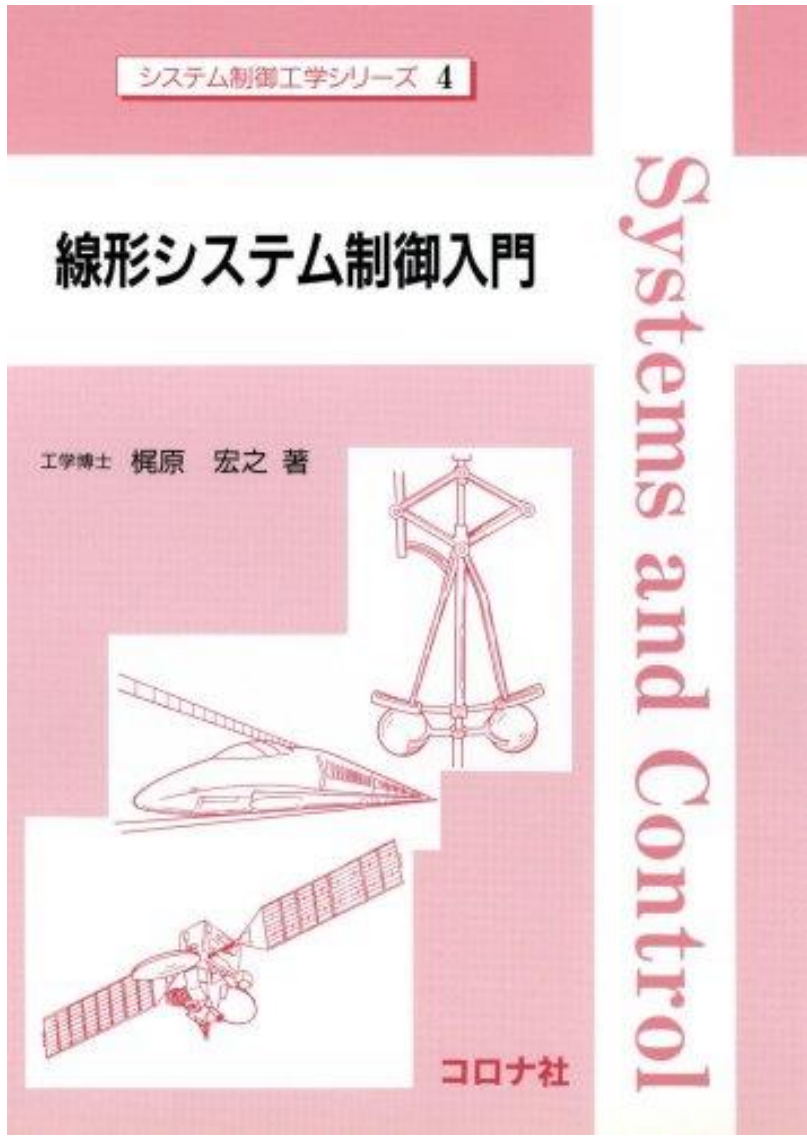
慶田君修論(2018)



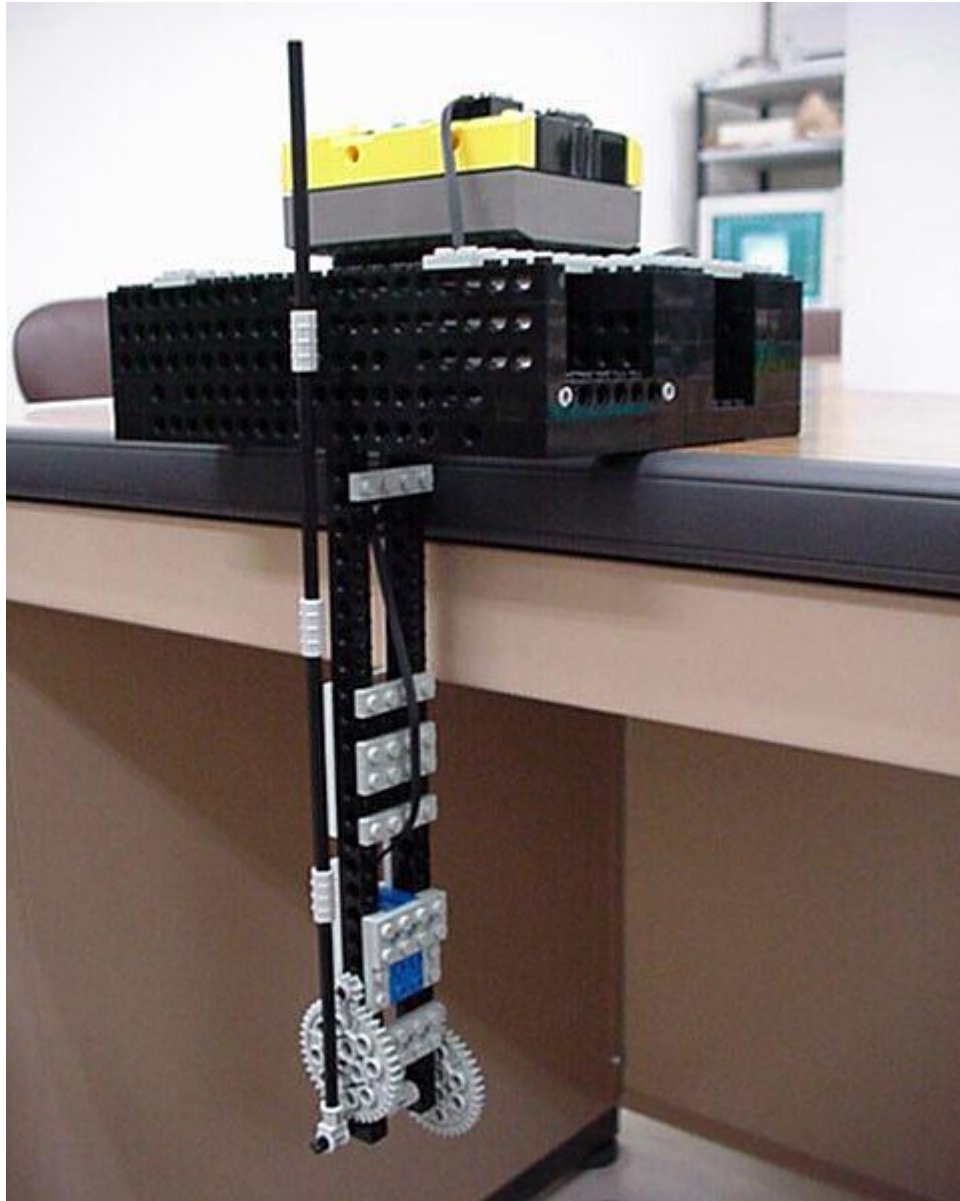
制御分野の教育研究



私のテキスト



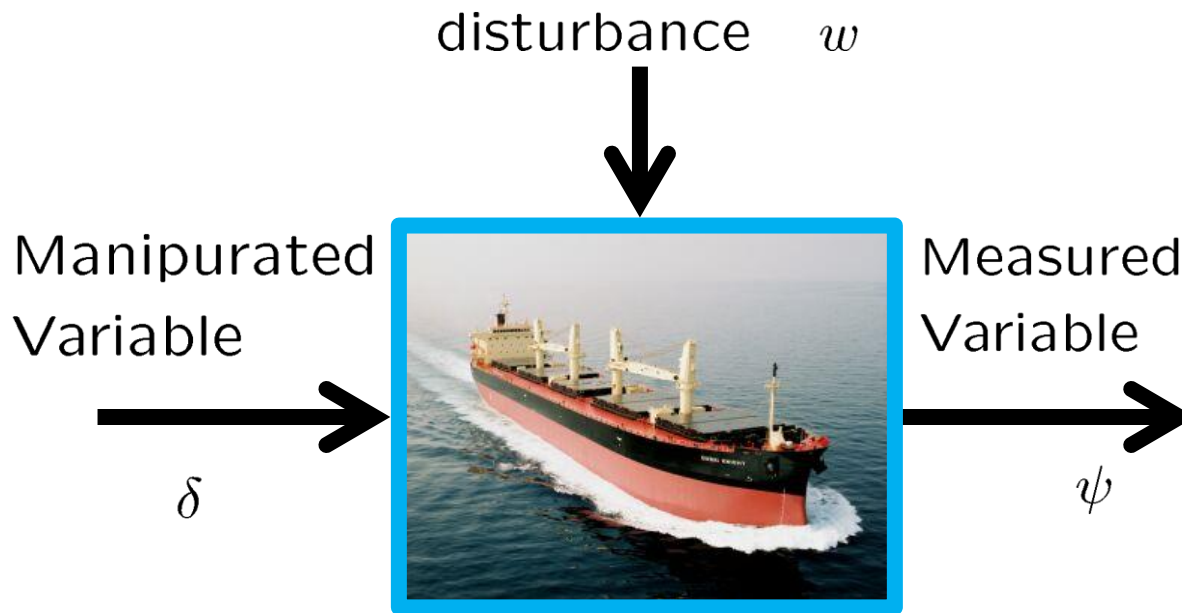
倒立振子



野本謙作先生



MOMOTO Model



Time lag

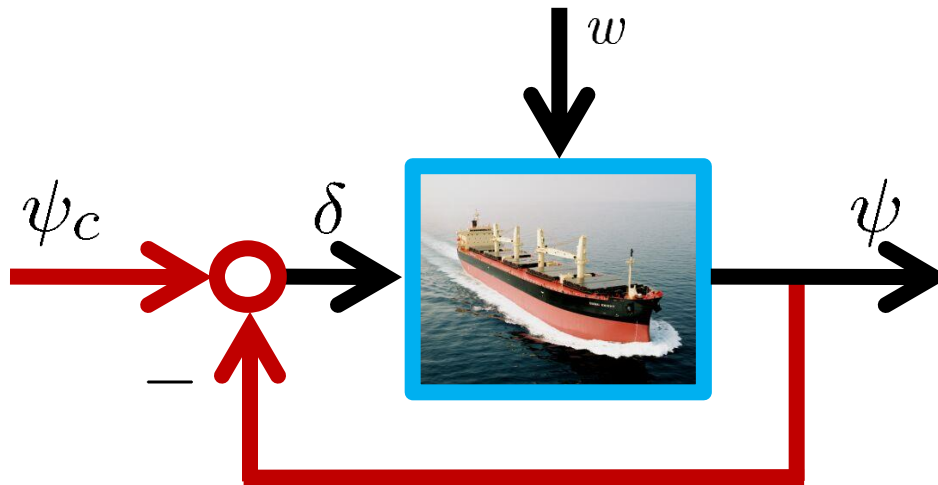
$$\dot{r}(t) = -\frac{1}{T}r(t) + \frac{K}{T}\delta(t - t_L) + w(t)$$

where

$$T = \frac{L}{U}T', \quad K = \frac{U}{L}K' \quad (U_1 \leq U \leq U_2)$$

Parameter Uncertainty Velocity Variation

Unity Feedback



- $\delta(t) = \psi_c - \psi(t)$
- motion equation

$$\begin{cases} \dot{\psi}(t) = r(t) \\ \dot{r}(t) = -\frac{1}{T}r(t) + \frac{K}{T}(\psi_c - \psi(t - t_L)) + w(t) \end{cases}$$

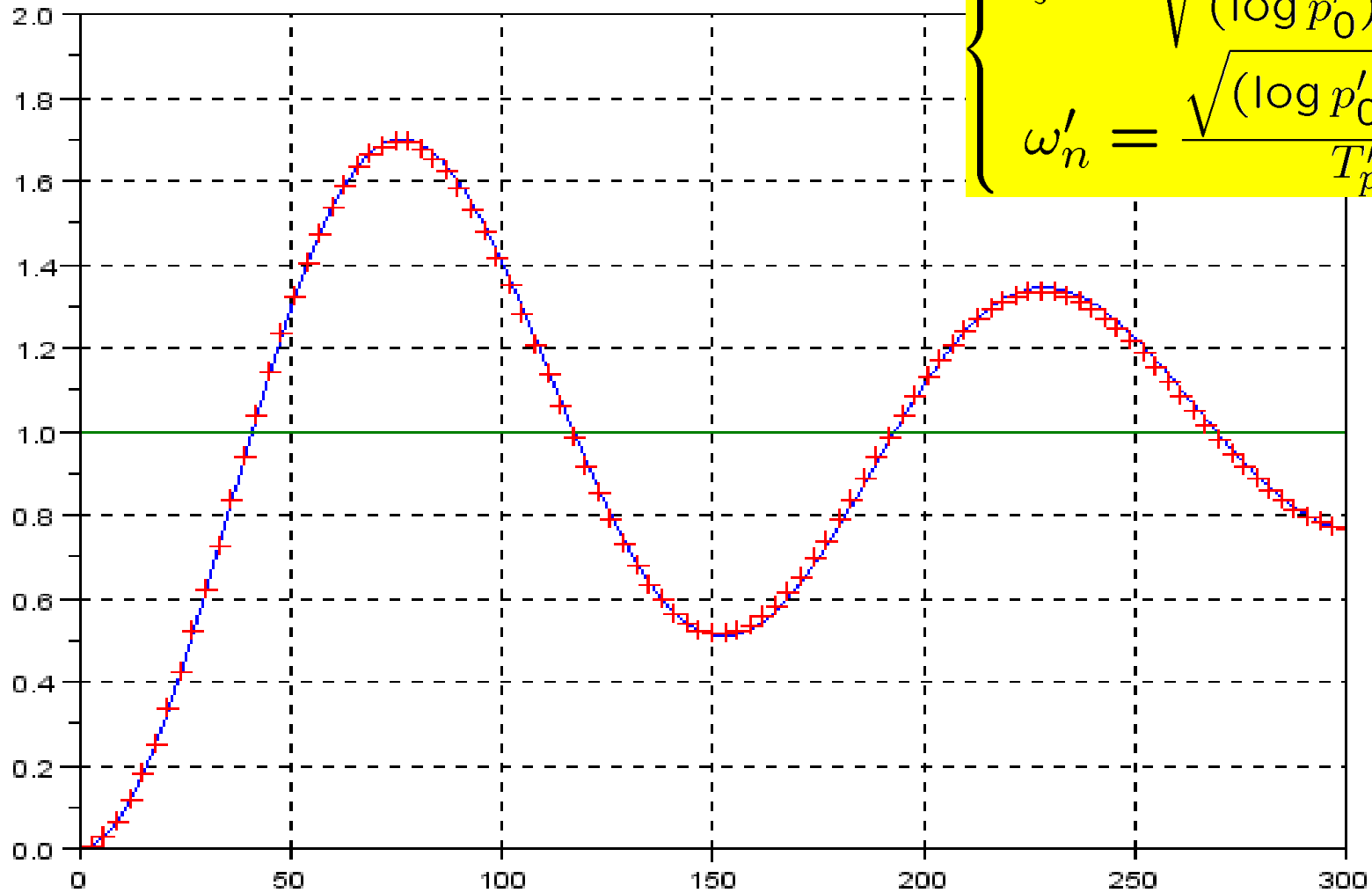
- state equation

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\psi}(t) \\ \dot{r}(t) \end{bmatrix}}_{\dot{x}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{T} & -\frac{1}{T} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \psi(t) \\ r(t) \end{bmatrix}}_{x(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T} \end{bmatrix}}_B \psi_c + \begin{bmatrix} 0 \\ w(t) \end{bmatrix}$$

$$t_L=0 \Rightarrow -K/T$$

Identification (tL=0)

Cargo Ship

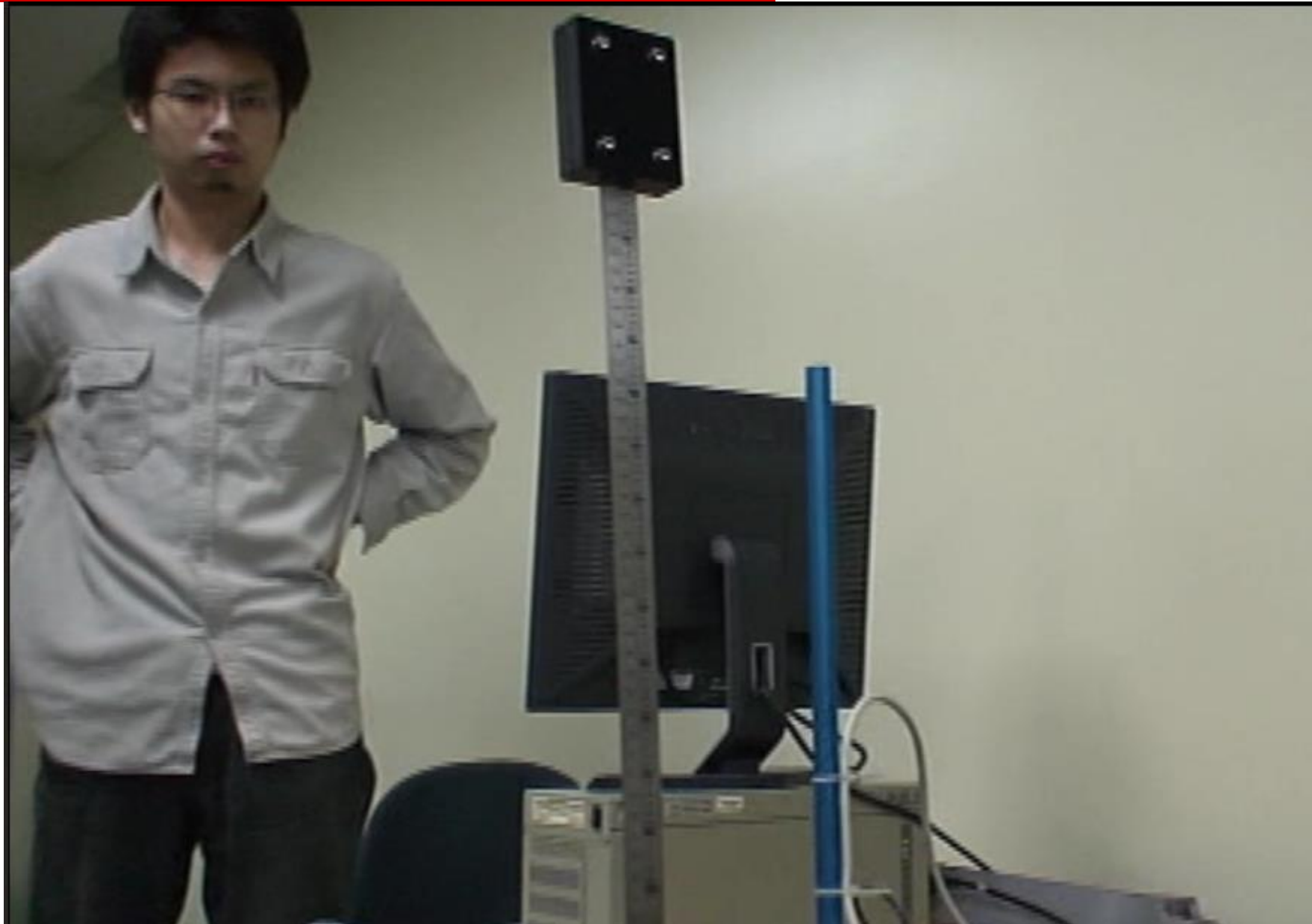


$$\left\{ \begin{array}{l} \zeta' = \sqrt{\frac{(\log p'_0)^2}{(\log p'_0)^2 + \pi^2}} \\ \omega'_n = \frac{\sqrt{(\log p'_0)^2 + \pi^2}}{T'_p} \end{array} \right.$$

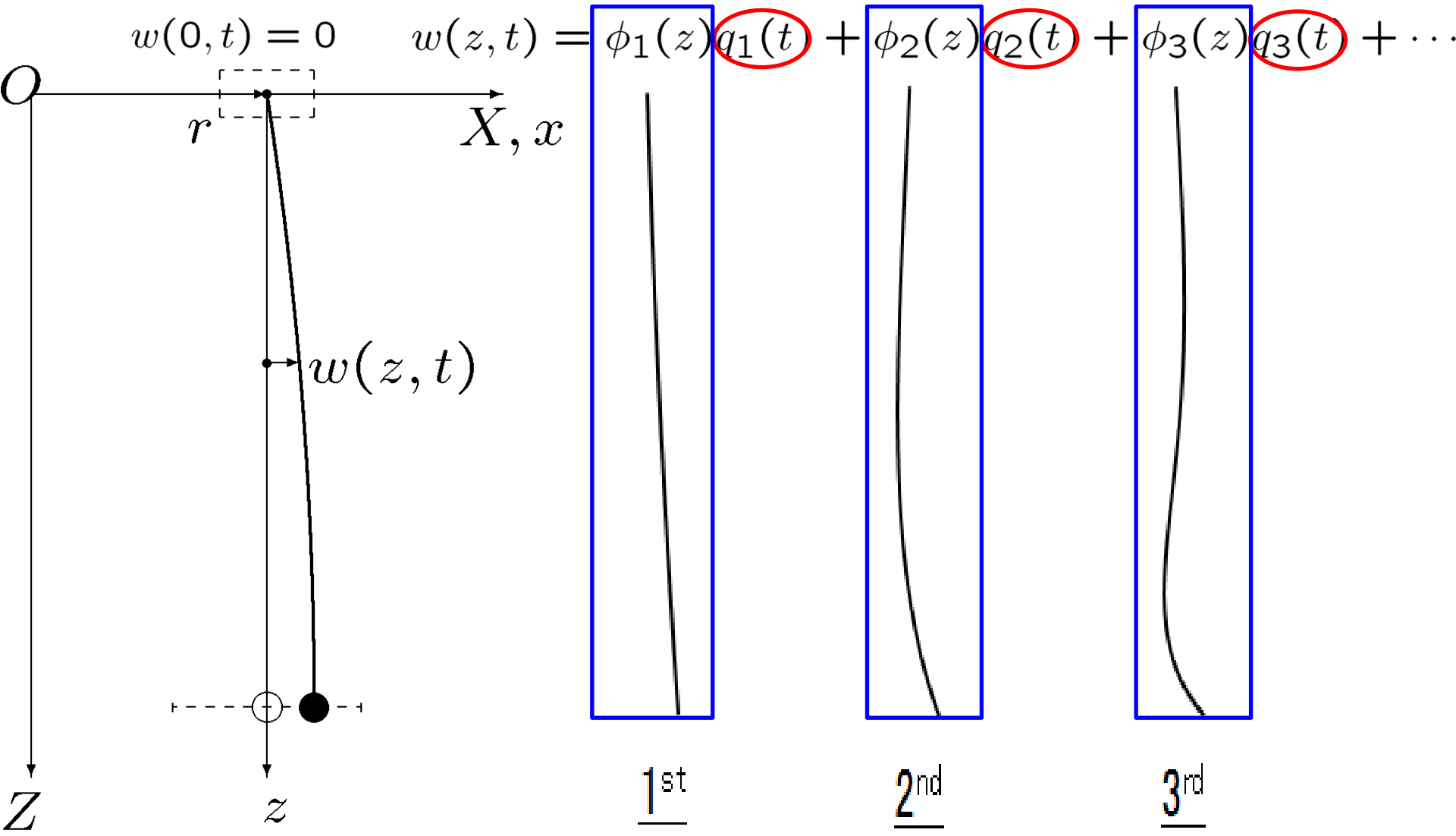
作業船模型実験



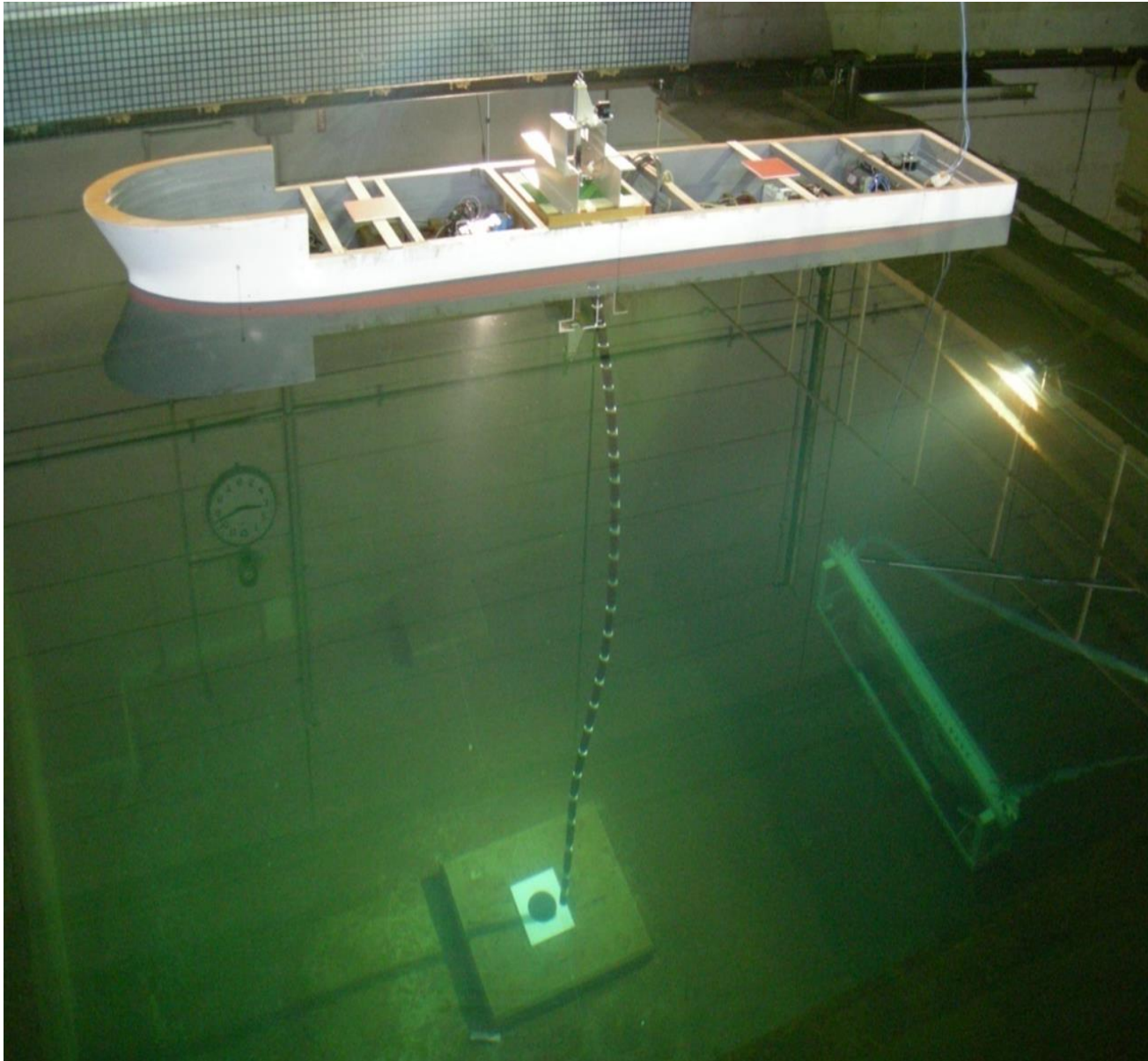
柔軟倒立振り子



State Variables q_1, q_2, \dots



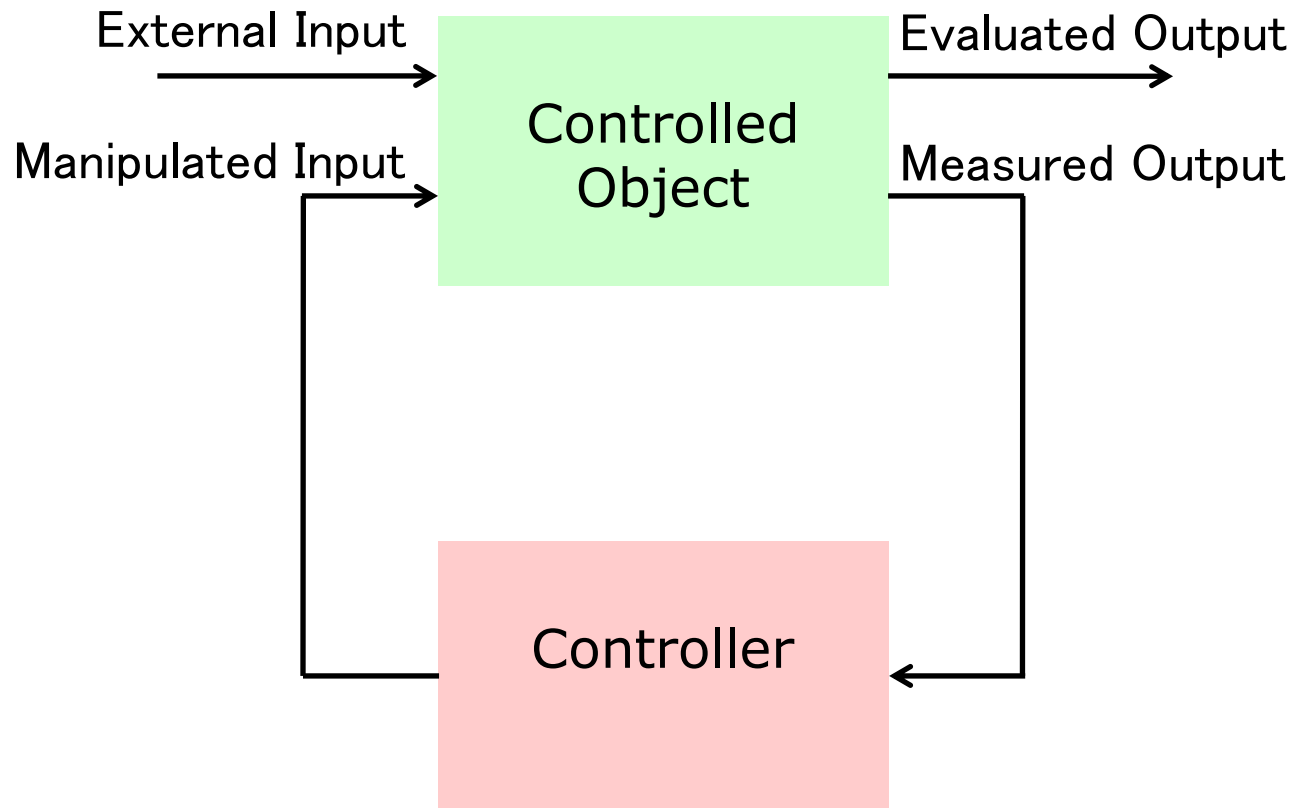
リエントリ制御



HILS for Control System Design

DESIGN-PC (MATLAB/SIMULINK)

Step1) Development of Nonlinear Simulator



Step2) Design of Controller

Virtual Control Experiment

SIMULATOR-PC (Windows Target)

Step3) Real-Time Calculation of Nonlinear Simulator

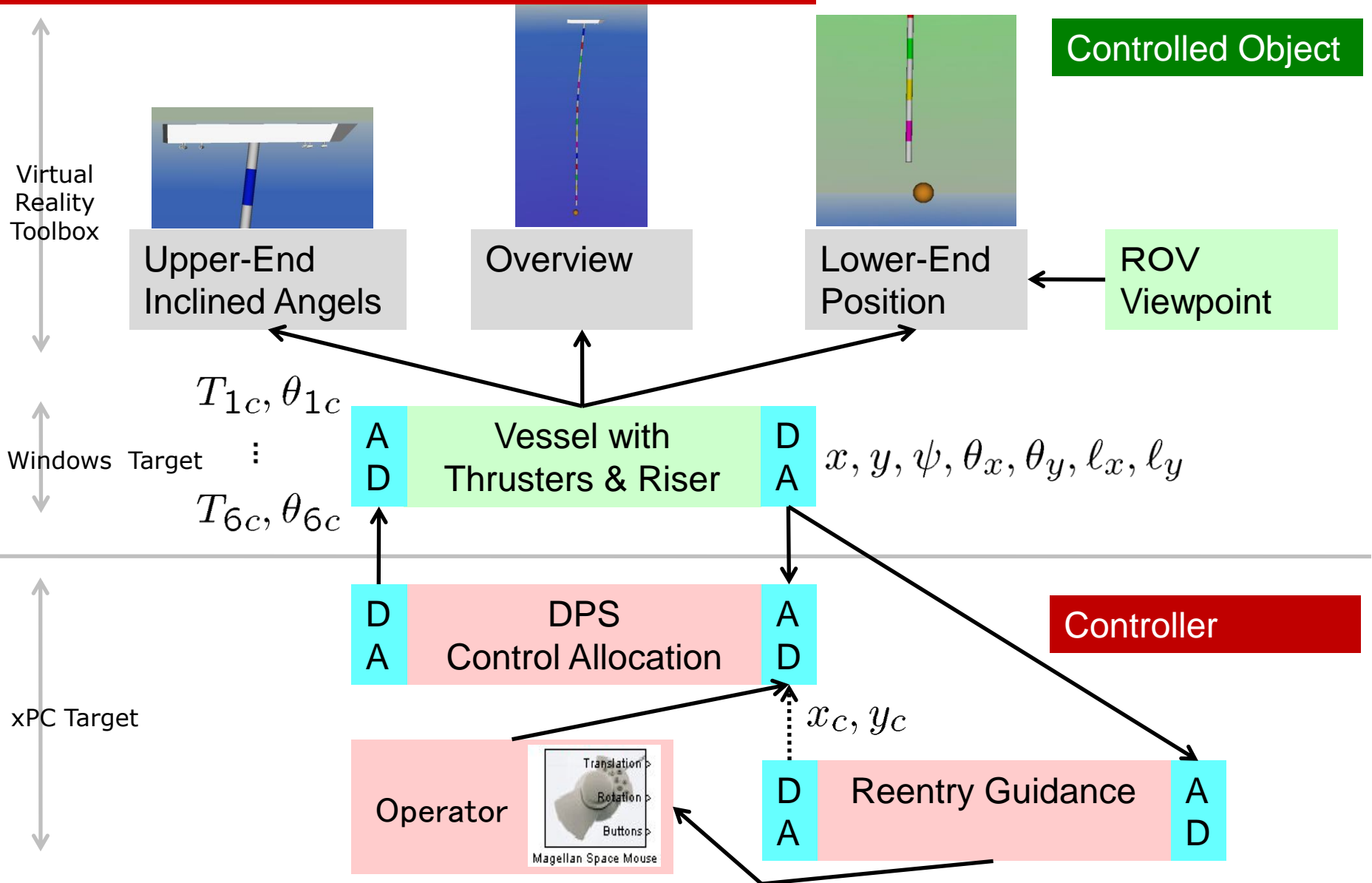


CONTROLLER-PC (xPC Target)

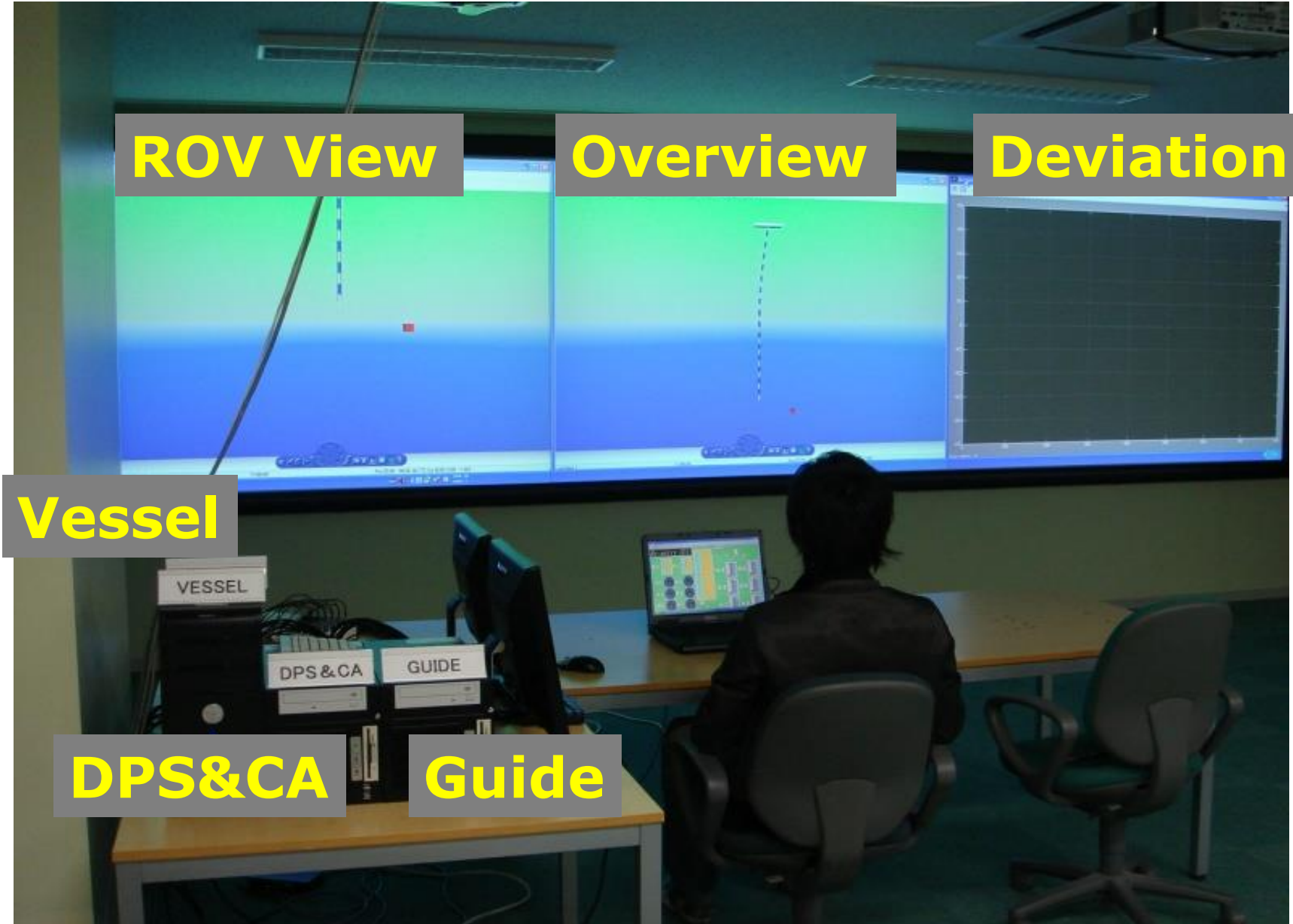


Step4) Implementation of Controller

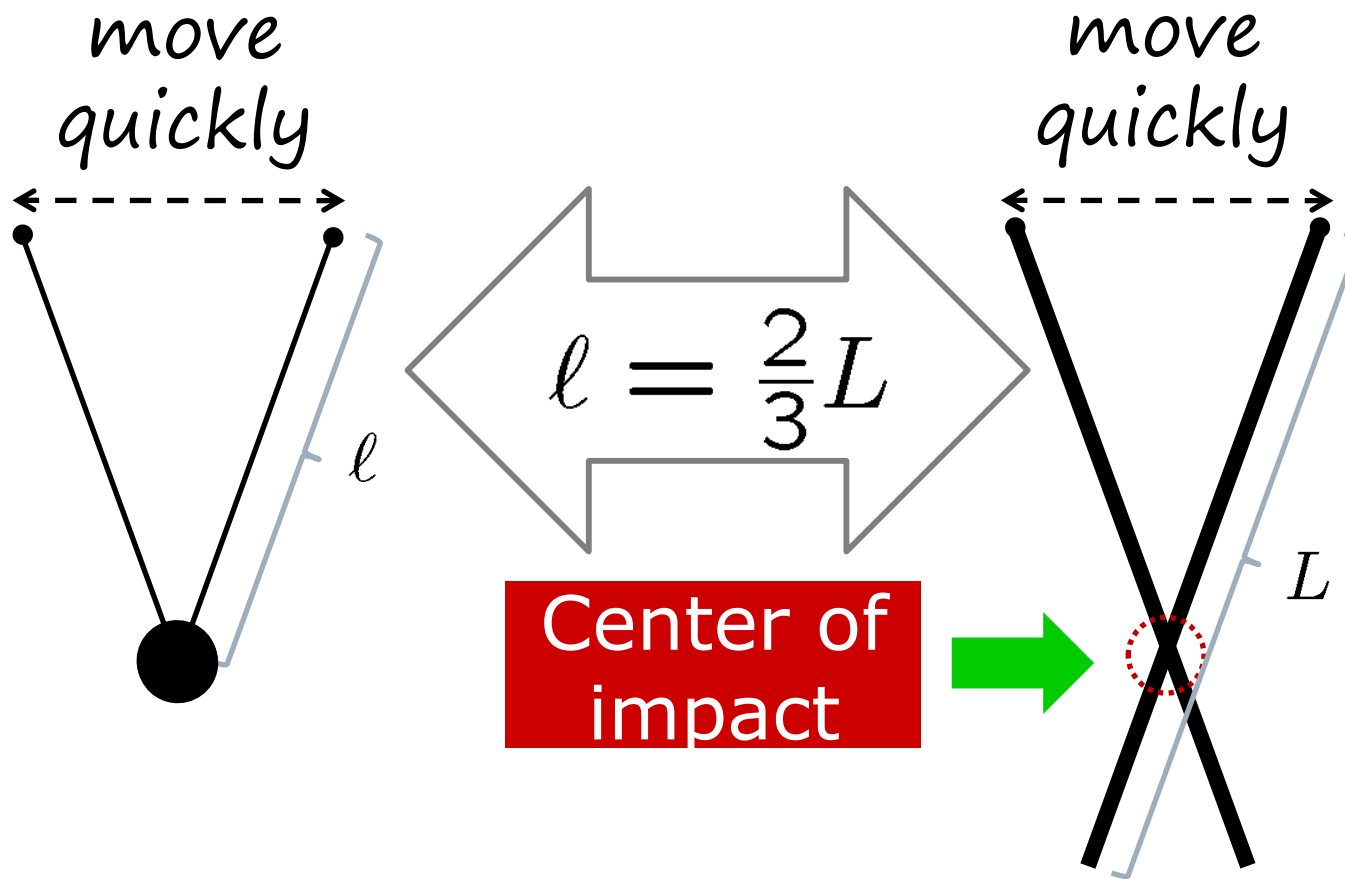
Developing Training Simulator



トレーニング・シミュレータ



Center of Impact



The controlled variable should be such a *physically unmovable point*, what we call, a *node*.

Finding a Controlled Variable

$$\begin{cases} \cancel{(M + m)\ddot{r} + ml \cos \theta \ddot{\theta} - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta = F} \\ ml \cos \theta \ddot{r} + \frac{4}{3}ml^2 \ddot{\theta} = mgl \sin \theta \\ \Downarrow \cos \theta \simeq 1, \sin \theta \simeq \theta \end{cases}$$

$$\underbrace{\ddot{r} + \frac{4l}{3}\ddot{\theta}}_{\frac{d^2}{dt^2}(r + \frac{4l}{3}\theta)} = g\theta \Rightarrow \frac{\Theta(s)}{R(s)} = \frac{-\frac{3}{4l}s^2}{s^2 - \frac{3g}{4l}}$$

non-
minimum
phase

$$\Downarrow z = r + \frac{2}{3}(2l)\theta$$

$$\ddot{z} = \frac{3g}{4l}(z - r) \Rightarrow \frac{Z(s)}{R(s)} = \frac{-\frac{3g}{4l}}{s^2 - \frac{3g}{4l}}$$

minimum
phase

Velocity Input Model

$$M_{21}\ddot{r} + M_{22}\ddot{q} + D_{21}\dot{r} + D_{22}\dot{q} + K_{22}q = F_q$$

$$\Downarrow \quad M_{21} = \text{diag}\{M_{21}(1), \dots, M_{21}(N)\}, \mathbf{1}_N = [1, \dots, 1]^T$$

$$\underbrace{\mathbf{1}_N \ddot{r}}_{\ddot{\xi}} + \underbrace{M_{21}^{-1} M_{22} \ddot{q}}_{-A_{22}} + \underbrace{M_{21}^{-1} D_{22} M_{22}^{-1} M_{21}}_{-A_{21}} (\underbrace{\mathbf{1}_N \dot{r} + M_{21}^{-1} M_{22} \dot{q}}_{\dot{\xi}})$$

$$+ \underbrace{M_{21}^{-1} K_{22} M_{22}^{-1} M_{21}}_{-A_{21}} (\underbrace{\mathbf{1}_N r + M_{21}^{-1} M_{22} q}_{\xi}) - \underbrace{M_{21}^{-1} K_{22} M_{22}^{-1} M_{21} \mathbf{1}_N}_{A_{23}} r$$

$$= \underbrace{(M_{21}^{-1} D_{22} M_{22}^{-1} M_{21} \mathbf{1}_N - M_{21}^{-1} D_{21})}_{B_2} \dot{r} + \underbrace{M_{21}^{-1} F_q}_{w_2}$$

$$\ddot{\xi} = A_{21}\dot{\xi} + A_{22}\dot{\xi} + A_{23}r + B_2\dot{r} + w_2$$

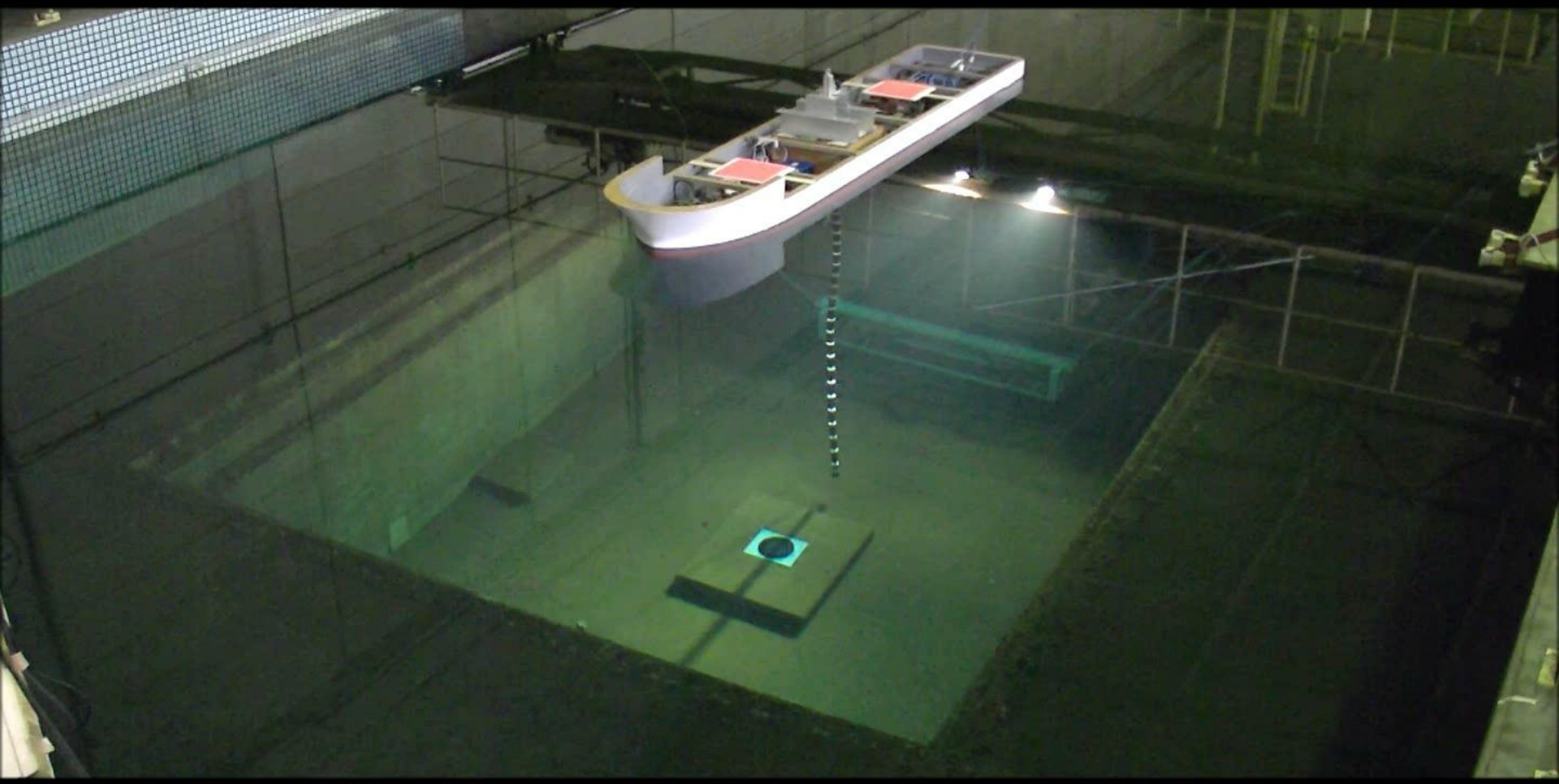
$$\Downarrow \quad q = M_{22}^{-1} M_{21} (\xi - \mathbf{1}_N r)$$

velocity
input

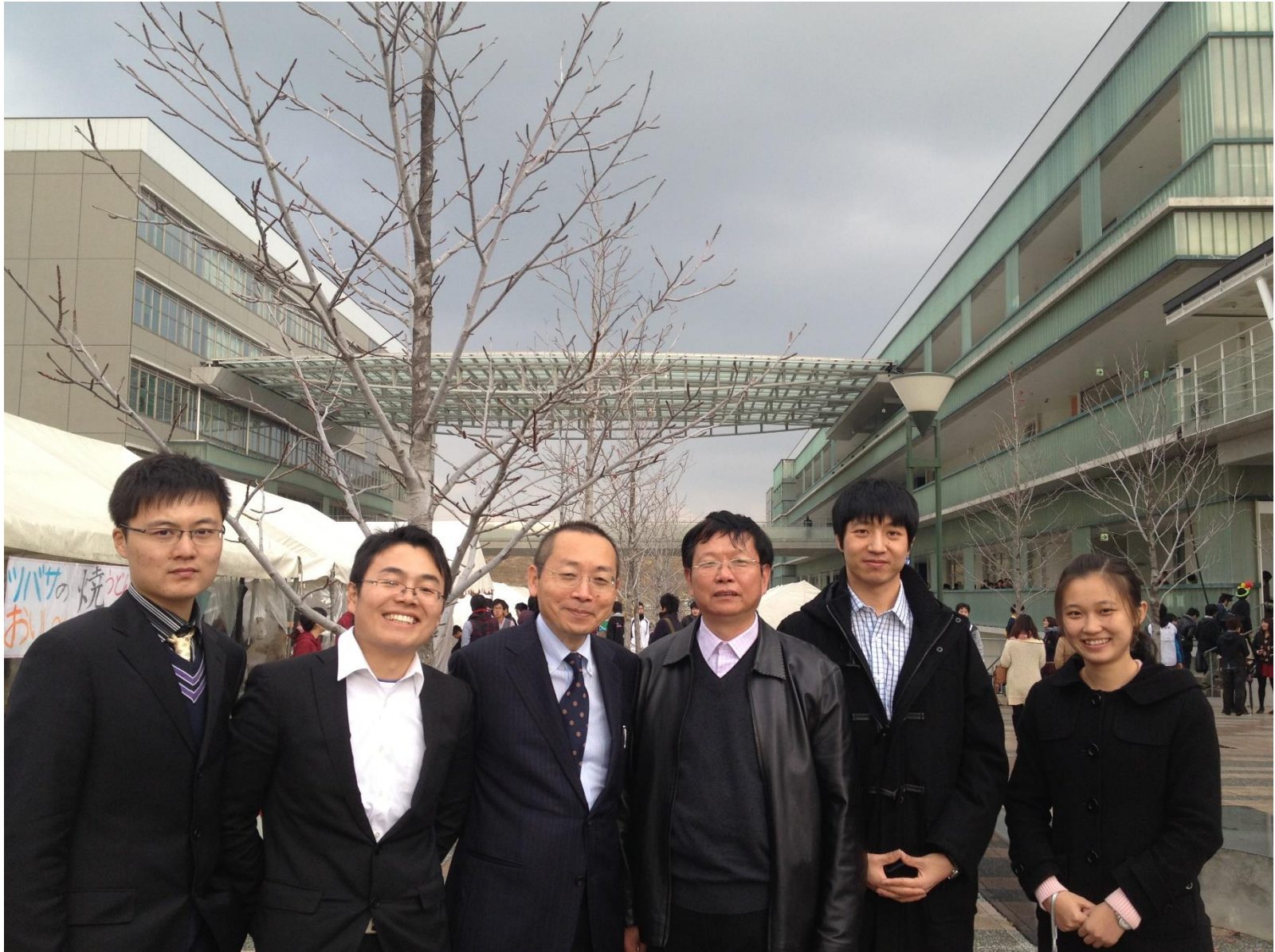
varying
parameter

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \\ r \end{bmatrix}}_{\dot{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I_N & 0 \\ A_{21} & A_{22}(|V_{rel}|) & A_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \\ r \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ B_2(|V_{rel}|) \\ 1 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\dot{r}}_u + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ w_2 \\ 0 \end{bmatrix}}_w$$

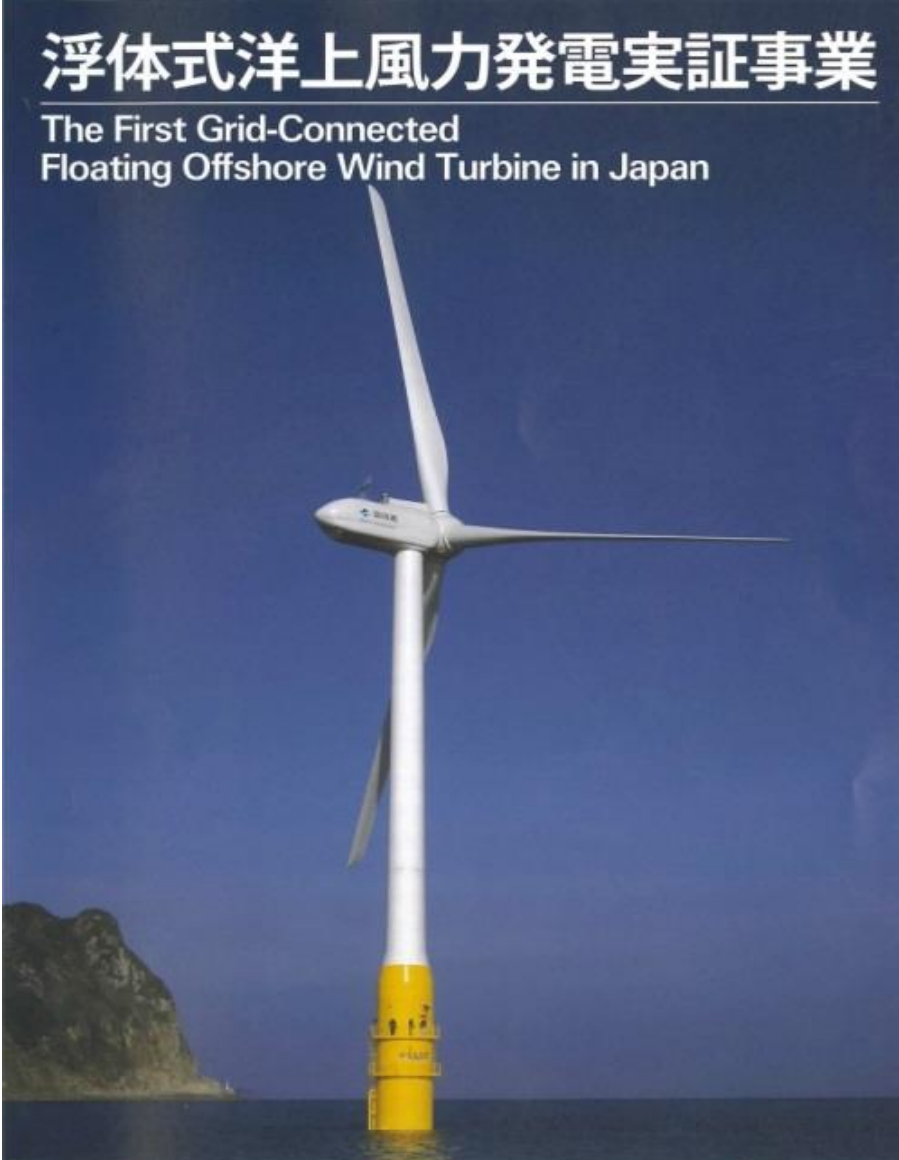
Exp#6 (Overview)



上海交通大学からの留学生




宇都宮智昭先生



浮体式洋上風力発電実証事業
The First Grid-Connected
Floating Offshore Wind Turbine in Japan

環境省 地球環境局 地球温暖化対策課
Floating Offshore Wind Turbine Demonstration Project
Ministry of the Environment, Government of Japan

 **環境省**
Ministry of the Environment

吉田基樹先生の論文： SMC

119

波浪中 Resonance-Free SWATH 運動の水中翼による非線形制御

正会員 吉 田 基 樹*
正会員 神 田 雅 光**

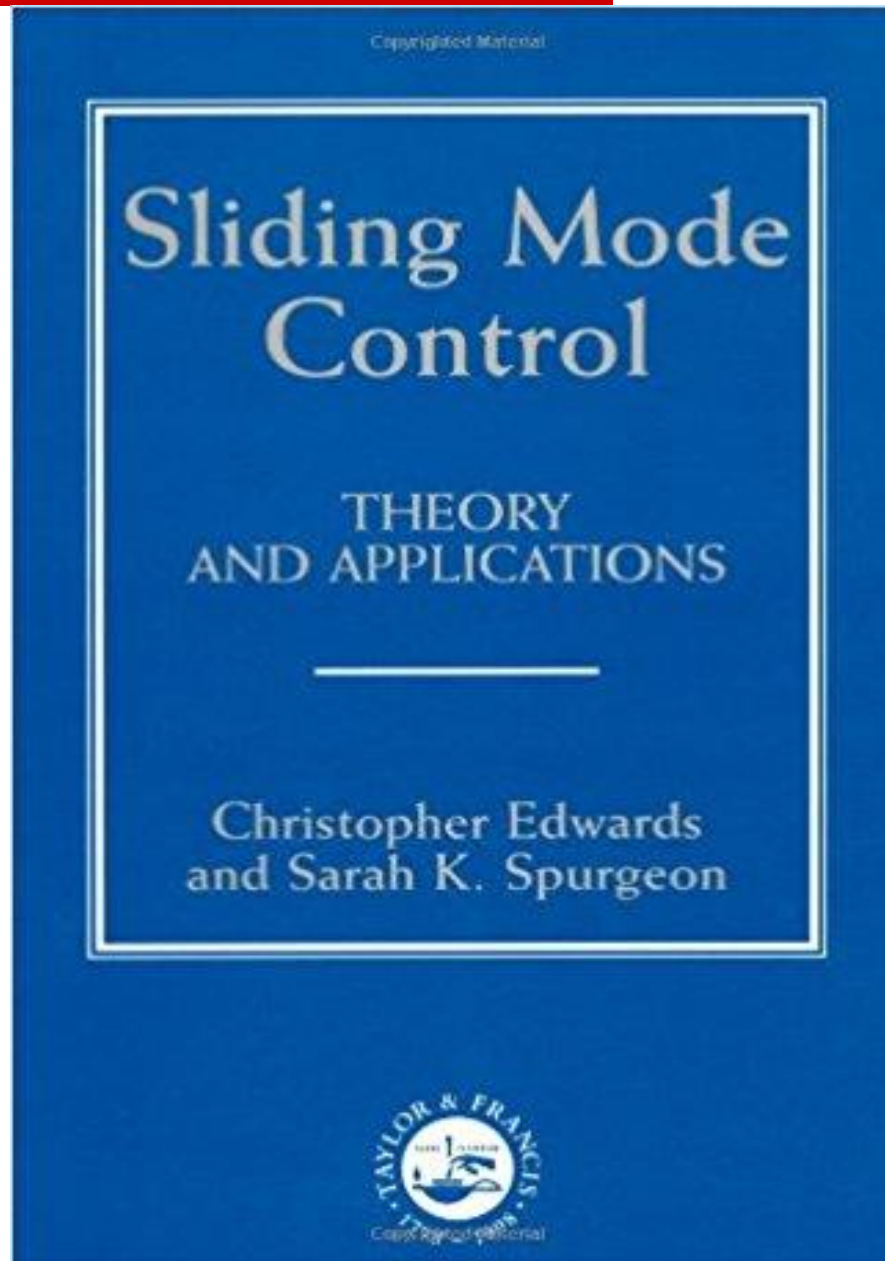
正会員 梶 原 宏 之*

Non-linear controlled motion of Resonance-Free SWATH using small underwater fins in waves

by Motoki Yoshida, *Member* Hiroyuki Kajiwara, *Member*
Masamitsu kanda, *Member*

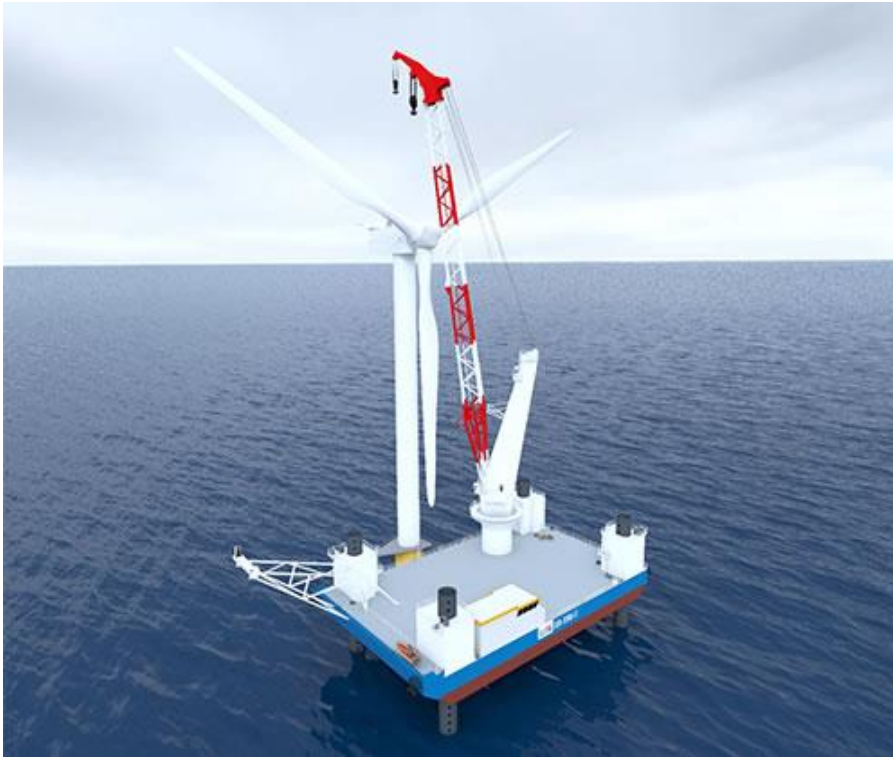
Summary

A Resonance-Free SWATH (RFS), which has negative restoring forces, is introduced to minimize the motion responses in waves because the strict time-punctuality and the high value of the cargo require the superior seaworthiness such as no speed reduction and no slamming. Accordingly, the attitude of RFS should be adjusted by small underwater control fins. The latent ability of RFS for seaworthiness is not completely made use in the case of PD control because P gain in PD control acts as the large restoring force. In this study, a nonlinear sliding mode control has been applied to make up for deficiencies in PD control. The simulation using the time domain simulator for the sliding mode control and the experiments using the model have been carried out. As a result, the effectiveness of the sliding mode control has been confirmed. The pitch motion response of RFS under the sliding mode control is decreased by half compared with PD control.

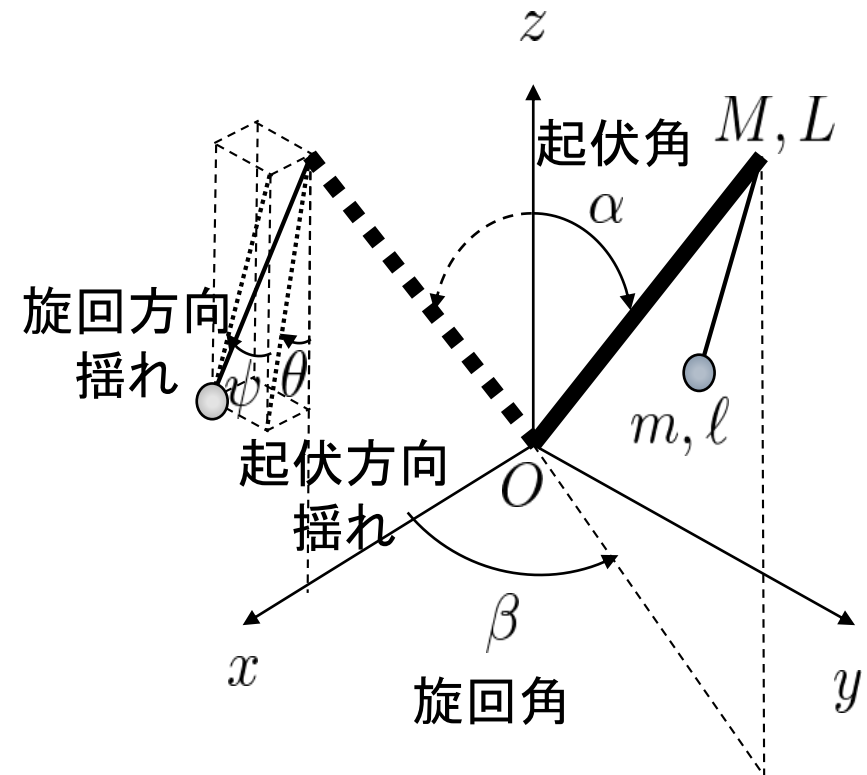


洋上施工の現状

- 洋上風車の施工を安全に実施可能なクレーン振れ止め制御方策の考案



実際のクレーン



クレーンの簡易モデル

長さの変動方式

- パーセント変動: $l(t) = l_0(1 + \alpha(t))$

$$l(t)\ddot{\theta}(t) = -(g + \ddot{l}(t)) \sin \theta(t) - 2\dot{l}(t)\dot{\theta}(t) - w \cos \theta(t)$$

↓

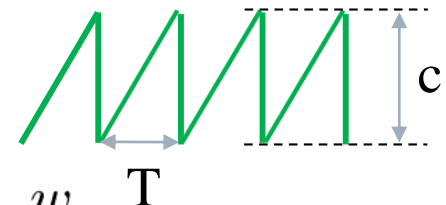
$$(1 + \alpha(t))\ddot{\theta}(t) = -\left(\frac{g}{l_0} + \ddot{\alpha}(t)\right) \sin \theta(t) - 2\dot{\alpha}(t)\dot{\theta}(t) - \frac{w}{l_0} \cos \theta(t)$$

- 正弦波変動: $\alpha(t) = c \sin \omega t \Rightarrow \dot{\alpha} = c\omega \cos \omega t, \ddot{\alpha} = -c\omega^2 \sin \omega t$

$$(1 + c \sin \omega t)\ddot{\theta} = -\left(\frac{g}{l_0} - \omega^2 c \sin \omega t\right) \sin \theta(t) - 2\omega c \cos \omega t \dot{\theta}(t) - \frac{w}{l_0} \cos \theta(t)$$

- 鋸波変動: $\alpha(t) = c\left(\frac{t}{T} - \lfloor \frac{t}{T} \rfloor\right) \Rightarrow \dot{\alpha} = \frac{c}{T}, \ddot{\alpha} = 0$

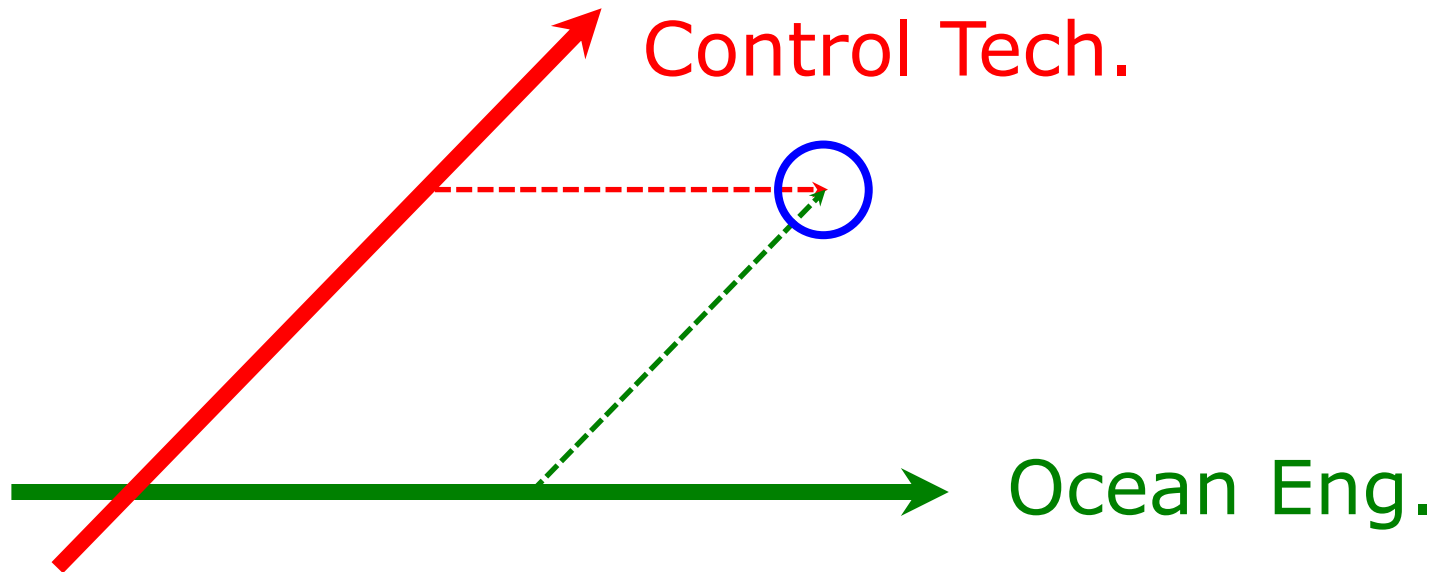
$$(1 + c\left(\frac{t}{T} - \lfloor \frac{t}{T} \rfloor\right))\ddot{\theta}(t) = -\frac{g}{l_0} \sin \theta(t) - \left(2\frac{c}{T}\right)\dot{\theta}(t) - \frac{w}{l_0} \cos \theta(t)$$



一定の減衰力が得られる可能性

私からのメッセージ

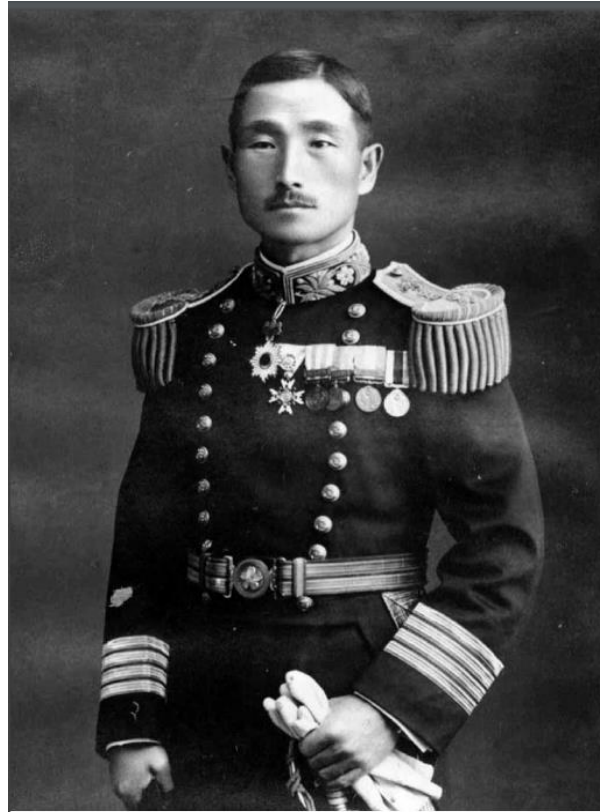
PNUでの講義から



Having control technologies as the second axis will expand your engineering ability.

Thank you for your attention.

野中季雄先生



工学博士。元海軍造船中将。激動の明治・大正・昭和初期に掛けて戦艦「扶桑」「長門」、巡戦「赤城」や潜水艦など多数の艦船の設計、建造に当たる。海の時代と言われ、欧米の先進国に肩を並べようとしていた時期に、日本の造船技術を世界のトップクラスにまで高め、日本造船のあけぼのの時代を切り開いた人物で「海軍造船の至宝」と言われた。退役後は、九州帝国大学教授となり昭和十年、現九州大学の名誉教授となる。

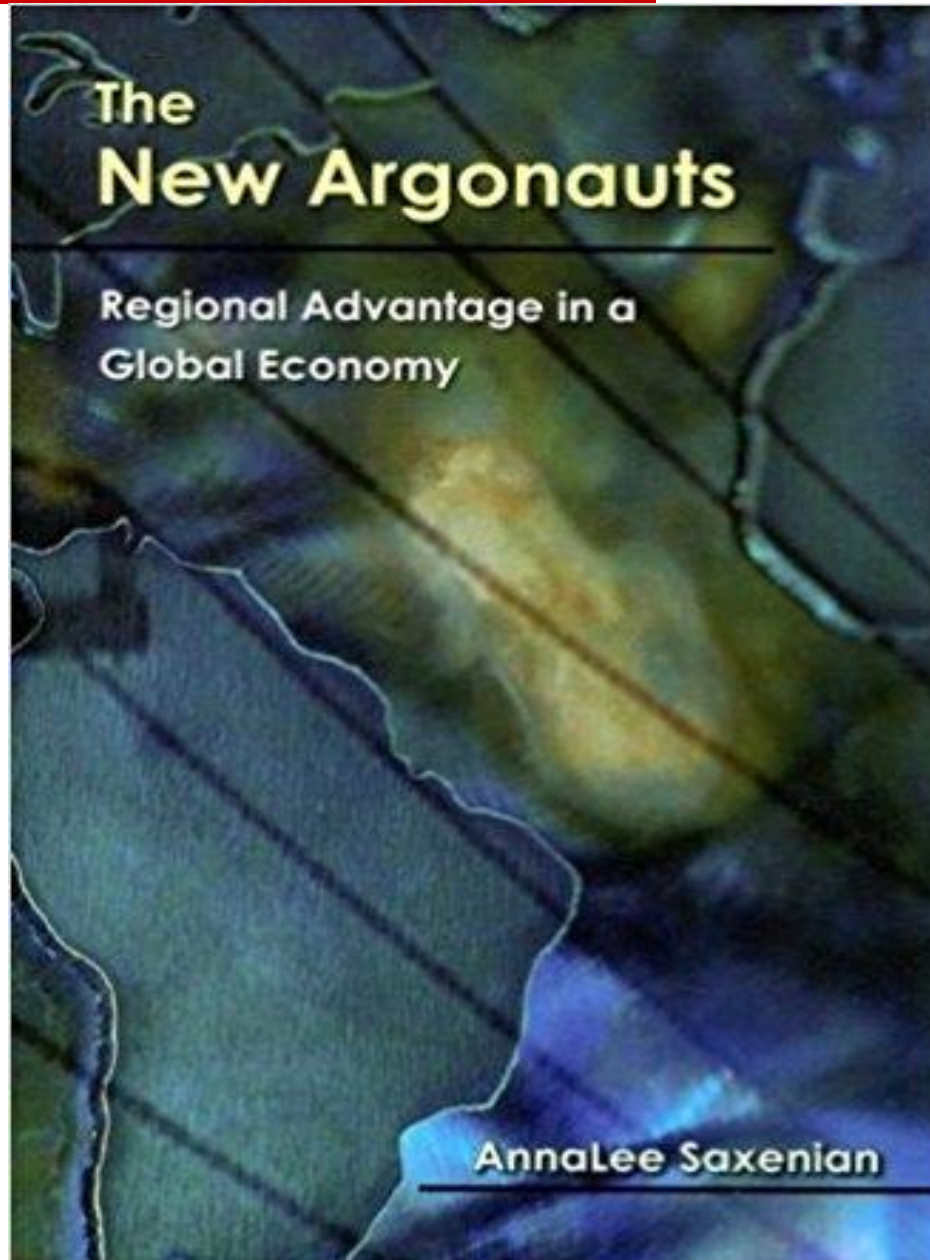


野
の
中
季
雄

海軍造船の至宝（二八七四～一九五九）

なかすえお

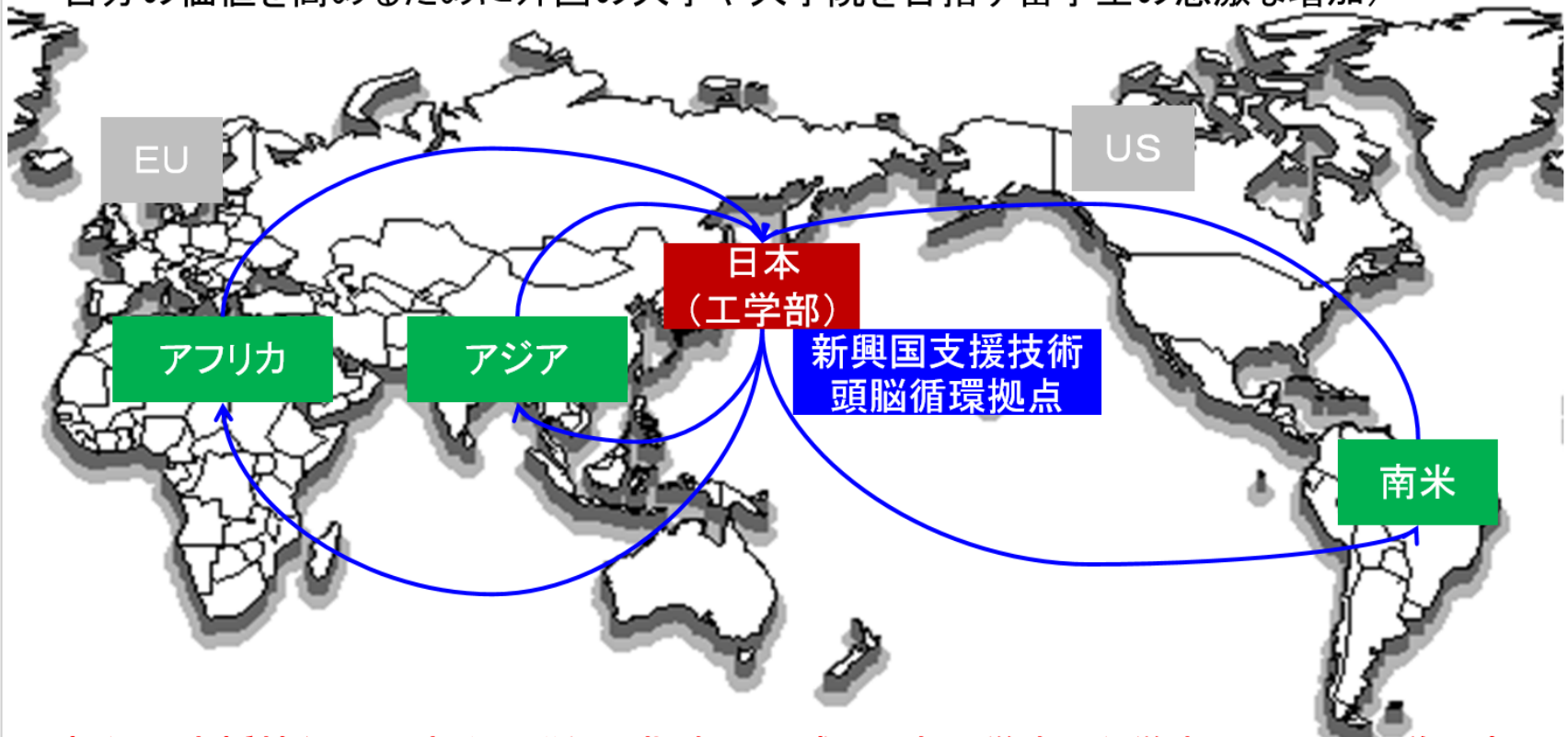
頭腦循環



8大学工学部長会議

大学国際戦略分科会(第1分科会)からの提言

- ・地球規模の問題解決(環境問題、資源争奪)のために革新的科学技術の創出が必要
- ・新興国の台頭を背景にした**優秀な留学生の獲得競争**(グローバル経済の人材市場で自分の価値を高めるために外国の大学や大学院を目指す留学生の急激な増加)



新興国支援技術に関する頭脳循環拠点の形成、日本人学生と留学生との間の切磋琢磨
 【博士課程】新興国支援技術研究課題を提示した学生募集、日本人学生の「武者修行」、学生による国際セミナーの自主開催 【修士課程】ダブルディグリー等による「他流試合」
 【学士課程】短期留学による異文化体験、「英和併記テキスト」等による英語による教育

イノベーションエコシステム

Purpose: Training *New Argonauts* for the *Brain Circulation* among developing countries and Japan, and constructing an *ECO System* in Engineering Education.

Innovation ECO System managed by COI

Startups
by Graduate Students

Exits
into Companies

Open Problem
Formulations
in COI (Center of Innovation)

Incubation
Acceleration
by Faculties, Mentors

Investments
by VCs and Engels



工学分野のイノベーションを牽引する エコシステムの社会実装

Social Implementation of an Ecosystem to Stimulate Engineering Innovations

梶原 宏之^{*1}

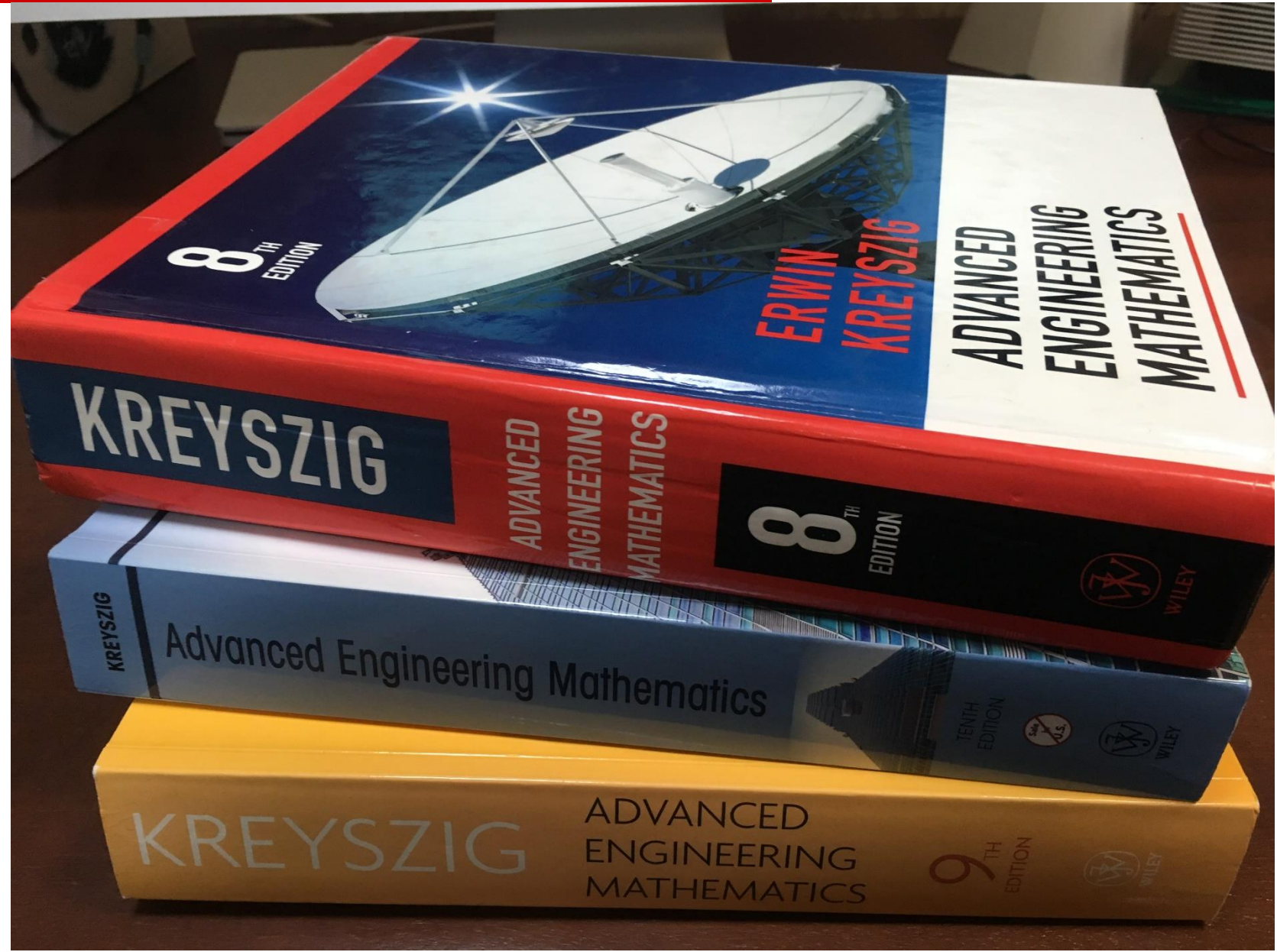
Hiroyuki KAJIWARA

The paper discusses about a framework of the internationalization of the engineering education and considers how to implement the innovation ecosystem along this. Firstly, after reviewing the AnnaLee Saxenian's book, an international strategy of brain circulation is clarified that, as a result, was given the United States. Secondly, a framework of globalization of the engineering education that our country can take is proposed. Thirdly, it is shown that the actual situation that innovation happens one after another in current Silicon Valley is caught with the frame called the ecosystem. Fourthly, the problems are discussed to implement the innovation ecosystem.

Keywords : Engineering Education, Brain Circulation, Internationalization, Innovation, Ecosystem, Silicon Valley

キーワード：工学教育，頭脳循環，国際化，イノベーション，エコシステム，シリコンバレー

ゼミ本： 数学



最適性原理

Sec. 21.3

Bellman's Optimality Principle. Dijkstra's Algorithm

1021

Bellman's minimality principle (or optimality principle)

If $P: 1 \rightarrow j$ is a shortest path from 1 to j in G and (i, j) is the last edge of P (Fig. 454), then $P_i: 1 \rightarrow i$ [obtained by dropping (i, j) from P] is a shortest path $1 \rightarrow i$.

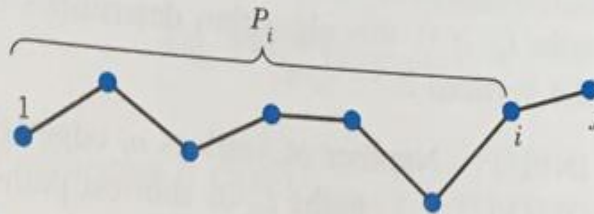


Fig. 454. Paths P and P_i in Bellman's minimality principle

PROOF. Suppose that the conclusion is false. Then there is a path $P_i^*: 1 \rightarrow i$ that is shorter than P_i . Hence if we now add (i, j) to P_i^* , we get a path $1 \rightarrow j$ that is shorter than P . This contradicts our assumption that P is shortest. ▶

皆さん、ありがとう！



資料



1999-2001年度 学生論文

平成12(2000)年度

【卒業論文】

高比良健一+橋本祐樹：離散事象システム解析ツールの開発（梶原）

佐藤晃一+宮川弘史：強化学習アルゴリズムによる移動ロボットの自律化（梶原）

内山秀三+花田和憲：バーチャルリアリティ技術によるAUVの設計（梶原）

計画

ロボ

制御

平成11(1999)年度

【卒業論文】

鈴木直人：離散事象システムのGA最適化に関する研究（梶原）

豊岡房亨：MINDSTORMSによる倒立振子の安定化実験（梶原）

矢形孝平：自律ボートの動特性同定に関する研究（梶原）

計画

ロボ

制御



平成13(2001)年度

【修士論文】

鈴木直人：離散事象システム理論による水中歩行ロボットの歩容アルゴリズムに関する研究（梶原）

豊岡房亨：強化学習による移動ロボットの非構造化環境における行動計画に関する研究（梶原）

矢形孝平：流体力係数の不確かさを考慮した水中ビークルのロバスト制御に関する研究（梶原）

計画

ロボ

制御

【卒業論文】

黒崎大輔：海底ケーブル製造インナラインにおける溶接自動化のための画像センサの開発（梶原）

運尾和樹+本田大作：6足歩行ロボットのモデリングと軟弱地盤を考慮した歩容シミュレーション（梶原）

片山智博+中島一誠：MINDSTORMSによる6足歩行ロボットの表現（梶原）

制御

ロボ

ロボ



2002-2003年度 学生論文

平成14(2002)年度

【修士論文】

内田慎吾：水中ピークルに対するLMIベースド簡易コントローラの開発に関する研究（梶原）

佐藤晃一：実数値GAを用いた上水道配水ネットワークにおける水圧最適制御に関する研究（梶原）

高比良健一：分散サーバイザ制御理論による生産ロボットの動作解析とサーバイザの設計・実装に関する研究（梶原）

橋本祐樹：ペトリネット・サーバイザ制御理論による自動搬送車の動作計画問題に関する研究（梶原）

鷗野隼人：画像情報に基づく自律ロボットの障害物回避に関する研究（梶原）

【卒業論文】

鈴木八重：計画問題における組合せ最適化—メタ戦略の適用に関する研究（梶原）

畑中知宏：強化学習機能のUML表現に関する研究（梶原）

五百木陵行：回転体に対する目標姿勢追従制御に関する研究（梶原）



制御

計画

ロボ

ロボ

ロボ

計画

計画

制御

平成15(2003)年度

【修士論文】

片山智博：離散事象システム理論によるパーツ仕分けロボット群の強調動作計画に関する研究（梶原）

中島一誠：マルチエージェント強化学習を用いた風力タービン群のパワーアシストに関する研究（梶原）

蓮尾和樹：NURBSツールボックスの開発と船体曲面の生産指標構築に関する研究（梶原）

本田大作：可変速風力発電機のための制御系設計に関する研究（梶原）

【卒業論文】

恩塚政憲+横田一平：アオサ回収システムの運動解析と制御系設計に関する研究（梶原）

草葉卓哉+真鍋崇寛+平山雷太：アオサ回収システムに関するフィジビリティ・スタディーアオサ専用回収船の模型実験（梶原）

ロボ

ロボ

計画

制御

ロボ

ロボ



2004-2005年度 学生論文

平成16(2004)年度

【修士論文】

五百木 陵行：海洋で用いる長大弾性管の受動性に基づく非線形制御系設計に関する研究（梶原）

制御

【卒業論文】

荒金 俊光：洋上風力発電群における相互パワーアシストのための制御規則に関する研究（梶原）

制御

池平 怜史：多目的遺伝的手法を用いた船内配管の設計に関する研究（木村）

福田 ゆか：造船所ストックヤードにおける銅板仕分け作業量の低減に関する研究（木村）

宮本 雄亮：電気探査法による水中作業ロボット用センサに関する研究（木村）



平成17(2005)年度

【博士論文】

大坪 和久：線形パラメータ変動制御技術の海洋工学分野への応用に関する研究（梶原）

制御

【修士論文】

恩塚 政憲：固体高分子型燃料電池システムのモデリングに関する研究（梶原）

制御

草葉 卓哉：電気探査による水中センサに関する研究（木村）

真鍋 崇寛：ピジュアルフィードバックによるライザー管リエントリー作業の自動化に関する研究（梶原）

制御

平山 雷太：船型設計における曲面生成とフェアリングに関する研究（木村）

【卒業論文】

白石 耕一郎+大沢 紗矢香：自律型水中ピークルの最適経路計画に関する研究（木村）

制御

上村 幸平+北島 慎悟：閉鎖型燃料電池システムのモデリングに関する研究（梶原）

林 勇二+山下 久考：ブロック組立ラインのCONWI Pスケジューリングに関する研究（梶原）

計画



2006-2007年度 学生論文

平成18(2006)年度

【博士論文】

中尾洋一：モデルベースアプローチによる造船所の生産性向上に関する研究（梶原）

計画

【修士論文】

池平怜史：バルブ操作性を考慮した配管自動設計に関する研究（木村）

間振宇：柔軟ビームのモデリングと安定化制御に関する研究（梶原）

制御

【卒業論文】

今村高輔：Max-Plus代数に基づく造船ラインのスケジューリングに関する研究（梶原）

計画

高江証詞：階層性を考慮したポンプ室の配管作業手順の分析に関する研究（木村）

田原大志：強化学習およびその操船への適用可能性に関する研究（木村）

吉田 諭：電気探査法を用いた水中用センサーに関する研究（木村）



平成19(2007)年度

【博士論文】

五百木陵行：掘削船DPS高度化のためのアジマススラスト推力配分とライザー管リエントリー制御に関する研究（梶原）

制御

【修士論文】

荒金俊光：モデル予測制御方式によるライザー管リエントリー制御（梶原）

制御

宮本雄亮：鋼板水切り・仕分け場の離散事象駆動シミュレーション（梶原）

計画

上村幸平：水中柔軟振り子のリエントリー制御実験（梶原）

制御

北島慎悟：燃料電池を搭載した水中ピークルの運動制御（梶原）

制御

林 勇二：サイクリック・タイム・ベクトルに基づく造船ラインのスケジューリング（梶原）

制御

【卒業論文】

乗富賢蔵+松井 仁：ライザー管リエントリー作業のための訓練シミュレータの開発（梶原）

制御

上田泰秀+中島聡子：即応性を考慮したアジマススラストの推力配分問題に関する研究（木村）

三隅壮太+初瀬太郎：三次元配管設計支援ツールの開発（木村）



2008-2009年度 学生論文

平成20(2008)年度

【修士論文】

今村高輔：水切・仕分場の待ち行列シミュレーションに関する研究（梶原）

高江証詞：造船ラインのMax-Plusスケジューリングに関する研究（梶原）

吉田 諭：電気探査式水中センサーにおける逆解析によるデータ処理（木村）

【卒業論文】

阿部達彦：アジマススラストをもつ浮体の運動制御に関する研究（梶原）

荒木一光：水切・仕分場のバーチャルリアリティ・シミュレーションに関する研究（梶原）

斉藤正幸：剰余抵抗曲線のデータ補間による推定（木村）

濱田啓太：画像処理によるライザー管模型運動計測に関する研究（梶原）

宮本達也：U S Bカメラによる画像認識と配管工事支援システムの可能性に関する考察（木村）

計画

計画

制御

制御



平成21(2009)年度

【博士論文】

池平怜史：船舶分野における配管設計の自動化手法に関する研究（木村）

白石耕一郎：動的計画法を用いたプランニング手法の船舶海洋工学分野への応用に関する研究（木村）

【修士論文】

上田泰秀：アジマススラストの推力配分の性能評価に関する研究（木村）

乗富賢蔵：海底掘削用ライザー管のリエントリー作業自動化のための制御系設計に関する研究（梶原）

三隅壮太：配管経路の形質を重視したGAによる配管設計自動化に関する研究（木村）

【卒業論文】

酒井栄輔：部材加工工場のバーチャルリアリティ・シミュレーションに関する研究（梶原）

波田聖司：ライザー管1m模型のリエントリー自動化に関する研究（梶原）

范叶王君：多自由度水中アームの動作獲得に関する研究（木村）

制御

計画

制御



2010-2011年度 学生論文

平成22(2010)年度

【博士論文】

人位康弘：ブロック組立工程のMax-Plusスケジューリングに関する研究（梶原）

計画

【修士論文】

荒木一光：銅板水切り・仕分け場の処理能力推定に関する研究（梶原）

計画

斉藤正幸：造船大組ブロックストックヤードの物流に関する研究（木村）

濱田啓太：船舶の開ループ同定に関する研究（梶原）

制御

宮本達也：拡張現実を用いた船殻認識システム（木村）

【卒業論文】

安藤悠人：ベントを考慮した配管設計アルゴリズム（木村）

岩下寛弥+寺野勇佑：造船工程のMAX-PLUSスケジューリングのためのVBAプログラムの開発（梶原）

計画

白石陽平：造船基本設計における船体主要目決定支援システムに関する研究（木村）

曾根田剛史：機器配置図におけるバルブ操作性評価方法に関する研究（木村）

河原遥毅+松岡晃史：作業船模型に対する位置姿勢検出とその推力配分制御に関する研究（梶原）

制御



平成24(2012)年9月

【博士論文】

Khairul Hassan : Heap-Model Based Approach to Pull-Type Scheduling in Ship Production Lines (ヒープモデル法による船舶生産ラインのプル型スケジューリング) (梶原)

計画

平成23(2011)年度

【修士論文】

波田聖司：ライザー管縦横連成運動のモデリングと制御に関する研究（梶原）

制御

酒井栄輔：造船所内ブロックストックヤードのスケジューリングに関する研究（木村）

【卒業論文】

池田大起：水中線条構造物模型の3次元運動計測に関する研究（梶原）

制御

河内基樹：USBカメラを利用した船殻ブロック工事進捗状況の自動認識に関する研究（木村）

野田和正：配管工事におけるパイプ取り付け順序の作業性評価（木村）

松岡亮祐：正面線図の自動生成に関する研究（木村）

山田利輝：先行中組をもつ中組工程におけるブロック投入順序決定に関する研究（梶原）

計画



2012-2013年度 学生論文

平成25(2013)年9月

【博士論文】

Shuai Meng : Nonlinear Vibration Analysis of a Cantilevered Pipe Discharging Fluid in the Sea (海中に流体を排出する片支持管の非線形振動解析) (梶原)

制御

制御

平成24(2012)年度

【修士論文】

河原遥毅 : RFS運動制御系に関する研究 (梶原)

制御

制御

【卒業論文】

進藤翔平 : 配管工事におけるパイプ配材計画の自動生成に関する研究 (木村)

松本拓也 : 水中線条構造物の3次元運動シミュレーションに関する研究 (梶原)

制御

制御

宮崎良平 : 海底資源探査法に関する考察 (木村)

安田達也 : 造船所内ブロックストックヤードのスケジューリング自動化に関する研究 (木村)

山村仁 : 造船ラインの2サイクル・プル型スケジューリングに関する研究 (梶原)

計画



平成26(2014)年9月

【博士論文】

Lei Duan : DEVELOPMENT OF COUPLED AERO-HYDRODYNAMIC MODELS AND DESIGN OF LPV CONTROLLERS FOR OFFSHORE FLOATING WIND TURBINES (浮体式洋上風車に対する空力流力連成モデルの開発とLPV制御則の設計) (梶原)

制御

制御

平成25(2013)年度

【修士論文】

池田大起 : 水中線条構造物の渦励振に関する研究 (梶原)

河内基樹 : 深度計測デバイスによるデータからの3D図面自動生成に関する研究 (木村)

野田和正 : 組立作業性を考慮したパイプ配材計画の自動生成に関する研究 (木村)

山田利輝 : RFS模型船の運動制御に関する研究 (梶原)

制御

制御

【卒業論文】

鬼塚博之 : 配管設計自動化についての研究 (木村)

小川智比古・藤原祐二 : 船内LANおよび船舶3D情報の高度利用に関する研究 (木村)

計画

制御



2014-2015年度 学生論文

平成26(2014)年度

【博士論文】

安藤悠人：船舶分野における配管経路自動設計に関する研究（木村）

【修士論文】

松本拓也：スライディングモード制御方式による風車ドライブトレインの制振技術に関する研究（梶原）

山村 仁：HEAP法を用いた造船所における作業員数平準化に関する研究（梶原）

進藤翔平：現場合わせ管の設計支援システムの開発（木村）

宮崎良平：海底資源掘削法についての考察（木村）

安田達也：3Dスキャナを利用した現場合わせ管の設計支援（木村）

【卒業論文】

堤 恭祐：造船所内ブロックストックヤードのスケジューリング自動化に関する研究（木村）

永井孝志郎：WebSocketを利用した分散型データベースによる船舶推進抵抗推定システム（木村）

中村 匠：現場合わせ設計における3Dスキャナの利用に関する研究（木村）

吉田裕一：タッチアンドクロス法による機器や分岐を含む配管自動設計（木村）



平成28(2016)年9月

【博士論文】

岩下寛弥：Heap法に基づくブロック組立計画自動化に関する研究（梶原）

平成27(2015)年度

【卒業論文】

岩内也樹、中原勇登：造船所における高速3Dスキャンデータの重ね合わせ処理による高精度計測に関する研究（木村）

慶田 航、佐多広海：Voxel図形の塗り潰しと細線化による配管自動設計に関する研究（木村）

水町祐大：小手造船所における定盤計画に関する研究（梶原）

制御

計画

計画

計画



2016-2017年度 学生論文

平成28(2016)年度

【修士論文】

小川智比古:配管の圧力損失の自動計算法についての研究(木村)

中村 匠:高速深度計測デバイスによる形状計測に関する研究(木村)

永井孝志郎: Kinect v2センサを用いた3DViewerの非接触閲覧システムの開発(木村)

藤原祐二:数値流体計算を利用した配管経路の自動設計(木村)

吉田裕一:無線LAN受信強度を利用した造船所内での作業者の位置推定システム(木村)

【卒業論文】

安部健介:干渉を無視した最短経路の重なり具合に着目した配管経路決定法(木村)

鹿野浩輝:数値流体計算を利用した配管経路決定法の検討(木村)

河津 優:渦励振ロックイン現象のモデル化に関する研究(梶原)

寺崎直樹:造船所内におけるIoTを用いた作業支援の検討(木村)

高杉英幸:造船工程計画における工数平準化手法に関する研究(梶原)

制御

計画



平成29(2017)年度

【修士論文】

岩内也樹:無線LAN受信強度を利用した位置推定システムに関する研究(木村)

慶田 航:RCPS Pアプローチによる造船工程計画プログラムの開発(梶原)

佐多広海:数値流体計算による配管自動設計に関する研究(木村)

中原勇登:配管自動設計における3D障害物データの簡略化処理に関する研究(木村)

水町祐大:船台建造定盤をもつ造船所の工程計画に関する研究(梶原)

【卒業論文】

青柳慎太郎:洋上施工クレーンの振れ止め制御に関する研究(梶原)

岡崎翔太:配管自動設計システムを利用したドローンの飛行経路探索の検討(木村)

神崎仁志:配管の圧力損失の自動計算システムについての研究(木村)

那須遼太郎:IoT利用ロボットによる作業支援に関する研究(木村)

村田昂矢:船舶海洋製図演習における船殻および線図作成システムの開発(木村)

高久隼人:ブロック搭載後作業の配員計画に関する研究(梶原)

計画

計画

制御

計画



學位論文： 高氏

Linear Parameter-Varying Control
of an Underwater Vehicle

Rui GAO

学位論文： 大坪氏、五百木氏

線形パラメータ変動制御技術の海洋工学分野
への応用に関する研究

大坪 和久

掘削船DPS高度化のためのアジマス
スラスト推力配分とライザー管リエン
トリ制御に関する研究

五百木 陵行

学位論文： 中尾氏、人位氏

モデルベースアプローチによる
造船所の生産性向上に関する研究

中尾 洋一

ブロック組立工程のMAX-PLUS
スケジューリングに関する研究

人位 康弘

学位論文： ハッサン氏、岩下氏

Heap-Model Based Approach to Pull-Type
Scheduling in Shipyard Production Lines

Khairul Hassan

Heap法に基づく
ブロック組立計画自動化に関する研究

岩下 寛弥

學位論文： 孟氏、段氏

Nonlinear Vibration Analysis of a Cantilevered
Pipe Discharging Fluid in the Sea

Shuai Meng

DEVELOPMENT OF
COUPLED AERO-HYDRODYNAMIC MODELS
AND DESIGN OF LPV CONTROLLERS FOR
OFFSHORE FLOATING WIND TURBINES

LEI DUAN

私の経歴

■ 学歴

- 1971年 福岡県立福岡高等学校卒業。
- 1975年 九州工業大学卒業(工学部電子工学科)
- 1977年 東京工業大学大学院修士課程修了(総合理工学研究科システム科学専攻)
- 1985年 工学博士(東京工業大学)

■ 職歴

- 1977年 東京工業大学助手(工学部)
- 1982年 岡山大学講師・助教授(経済学部)
- 1990年 九州工業大学助教授(情報工学部)
- 1999年 九州大学教授(工学研究院)

私のプロフィール

梶原宏之：1952年10月19日、佐賀市生まれ。当年65才。専門分野はシステム制御工学。

【学歴】1971年3月、福岡県立福岡高等学校卒業。1975年3月、九州工業大学卒業（工学部電子工学科）。1977年3月、東京工業大学大学院修士課程修了（総合理工学研究科システム科学専攻）。1985年9月、工学博士（東京工業大学）。

【東工大時代（75～81年、23才～29才、7年間）】75年4月、東工大の古田勝久研究室に所属（システム科学専攻第1期生）。修士論文は、汎関数オブザーバの構成アルゴリズムに関するもの。77年4月より5年間、同研究室助手。制御系CADプログラムの開発に3年間従事。多変数系のゲイン曲面（現在の σ プロットと関連）の整形による制御系CADを考案。実験は、2重倒立振子や磁気吸引浮上系の安定化制御など。

【岡大時代（82～89年、30才～37才、8年間）】82年4月より8年間、岡大経済で、数理統計学を講義。82年、上智大学猪口邦子氏と共同研究。83年～84年、学位論文「線形多変数制御系の計算機援用に関する研究」を執筆。85年～87年、単著「制御系CAD」を執筆・出版。MATLAB/MATRIXx/CTRL-Cを比較検討。88年～89年、RobustControlToolboxと μ ControlToolboxのマニュアルを翻訳。

私のプロフィール

【九工大時代（90～98年、38才～46才、9年間）】90年4月、母校飯塚キャンパスへ。91年から、九州大学応用力学研究所、小寺山亘研究室と共同研究開始。94年より「ビークルの運動と制御に関する研究会」に参加し、制御を意識したモノ作りの有用性の立場から、制御と力学との関わりに興味をもつ。ビークルの障害物回避時には大幅な速度変動を伴うことから、ゲインスケジューリング制御系の必要性を認識し、LMI（線形行列不等式）ベースのLPV（線形パラメータ変動）制御系を設計する方法論の検討を開始。95年7月に1ヶ月間、96年4月から3ヶ月間、仏国INRIAにP. Gahinetを、また97年10月から半年間、仏国ONERA-CERTにP. Apkarianをたずねて共同研究。また、彼らと共に、96年神戸で開催されたIEEE主催CDC（制御と決定に関する会議）で、LPV制御に関するチュートリアルセッションを開催。さらに、95年より、新しいシステム制御工学のテキストシリーズ(コロナ社)の企画に参画。

【九大箱崎時代（99～05年、47才～53才、7年間）】99年4月、九大の旧造船学科へ赴任。担当する教育研究分野は「システム計画学」。00年6月に、現代制御の入門書「線形システム制御入門」を執筆・出版。01年、教室主任（1回目）。02～03年、高鋭氏の学位論文指導（1人目）。03年4月、任期5年スタート。04年、教室主任（2回目）。03～05年、大坪和久氏の学位論文指導（2人目）。箱崎キャンパスでの7年間の経験を踏まえ、移転後の研究の方向性を、「造船初期計画のための方法論の確立」と「環境ロボティクスの創成」とする予定。

私のプロフィール

【九大伊都時代1（06～10年、54才～58才、5年間）】06年10月、伊都キャンパスへ移転。04～06年、中尾洋一氏の学位論文指導（3人目）。05～07年、五百木陵行氏の学位論文指導（4人目）。08年、教室主任（3回目）。再任され次期任期スタート。08～10年、人位康弘氏の学位論文指導（5人目）。09～10年、8大学工学教育プログラム実践強化委員会・副委員長。この5年間で、造船分野では造船ラインのMAX-PLUSスケジューリング、海洋分野ではライザー管のリエントリ制御について基礎研究を行った。これらに基づいて、次年度以降、「造船の計画管理」と「CO2深海底注入システム」を深化させる予定。

【九大伊都時代2（11～16年、59才～64才、6年間）】11年3月11日東北関東大震災。09～12年、ハッサン・カイル氏の学位論文指導（6人目）。12年、教室主任（4回目）。10～13年、孟師氏の学位論文指導（7人目）。11～14年、段磊氏の学位論文指導（8人目）。14年、海洋エネルギー資源共同研究部門設立に参画。杉江先生と「システム制御工学演習」を執筆・出版。15年、教室主任（5回目）。日本船舶海洋工学会論文賞。日本工学教育協会・九州工学教育協会共催年次大会においてシンポジウムを企画・実施。海洋開発人材育成コースを設置。海事振興連盟福岡TMにおいて発言。14～16年、岩下寛弥氏の学位論文指導（9人目）。

私のプロフィール

【九大伊都時代3（17年、65才、1年間）】

17年、山田拓史氏の学位論文指導（10人目）を開始。日伯共同授業system and control technologyの3回分(PID制御、LQG制御、制御応用)を担当。造船工程計画に対するRCPSPアプローチの実用性を造船6社の共同研究を通して検討開始。

【定年後の目標（18～22年、66才～70才、5年間）】

- 1) 造船工程計画に対するRCPSPアプローチの実践
- 2) 制御工学の反転授業のための教材開発
- 3) 船舶海洋分野の制御系設計に関するトピックスのまとめ



退職の辞（「吾」掲載の元原稿）

造船学教室を去るにあたって

梶原宏之

本年度末をもって退職を迎えます。平成11年度から19年に亘って、九州大学の造船学教室に教授としてお世話になりました。

まず九大とのご縁をいただいた経緯をご説明します。私は、学部は九州工業大学工学部電子工学科を昭和50年に卒業しております。ちょうど新幹線が博多まで開通した年で、東京工業大学大学院総合理工学研究科システム科学専攻修士課程に入学し、修了後、同大学工学部制御工学科・助手を5年間勤めました。この時点で私の専門性は制御工学として固まりました。その後、岡山大学経済学部講師・助教授を8年間勤めながら、工学博士の学位を取得し、最初の著作「制御系CAD」をまとめました。それから九州工業大学情報工学部制御システム工学科・助教授として9年間勤め、応用力学研究所の小寺山・中村研究室において、水中ビークルの運動制御系の設計を担当しました。私にとって初めての実用的な制御問題で、私の授業を受けていた守田氏（H3年九大造船卒）がLQI制御方式で水中ビークルの多変数制御実験に成功し、私は「制御を意識したモノ作り」の意義を明確に認識しました。自律型ロボットの制御は衝突回避が重要な課題ですが、水中ビークルの場合、速度変動に伴う流体微係数の変動をどう扱うかについてLPV制御という技術に注目しました。これを勉強するために仏国INRIAという研究所に計4か月、仏国ONERA-CERTという研究所に半年間訪問研究員として過ごし、その成果をまとめたLPV制御技術の応用論文は、私の研究生生活で引用回数が最多となっています。また、造船の貴島先生、応力研の小寺山先生、航空の桜井先生の共同主催による「ビークル研究会」に参加しておりました。折から、九大

退職の辞（「吾」掲載の元原稿）

では大学院重点化の動きがあり、造船学教室では教授1名、助教授1名、助手1名の7講座体制に改編し、「従来の造船学にシステム工学の要素を取り入れて継承発展させる」との方針が認められたとのことでした。このような状況下で、小川原先生の後任として、制御工学の授業を担当するお話をいただきました。私のような異分野の者を採用することは当時お世話になりました貴島先生、中武先生には大変勇気のいる決断ではなかったかと改めて拝察致します。それだけにこれから当教室で果たすべき責任の重さを感じておりました。

以上のようなバックグラウンドをもって、平成11年4月に、46歳で九大に赴任させていただきました。担当した研究室は「システム計画学研究室（3講座）」です。直ちに卒研究生3名（鈴木氏、豊岡氏、矢形氏）が配属され、野本モデルに基づくLPV制御、造船工程問題を意識した離散事象システム、船舶海洋分野のロボットへの適用が見込まれる強化学習などの研究指導を開始しました。学部生も大学院生も理解度がすばらしく、「授業が楽しくして仕方ない」と感じていた記憶があります。現代制御の理論にストーリー性を持たせたテキスト「線形システム制御論」を単著で、のちに「システム制御工学演習」を共著で出版しました。箱崎キャンパスでのある日の教授会で、資源教室のある先生から「私たちは九工大や東工大がやっている数学には歯が立たなかった、その代わり中州で人間学をやっていた」と伺いました。これを聞いた私は、旧帝大と工大の教育が目指すものの違いについて目から鱗の思いがして、自分が今教えている学生は将来の幹部候補生であり、世の中をリードしていける人材として養成しなければならないと強く思いました。また当時の工学部長から「博士課程の学生を毎年もたない教授は研究大学の教授ではない」との趣旨を伺いました。結局博士課程

退職の辞（「吾」掲載の元原稿）

学生として、高氏（モデロン）、大坪氏（海技研）、五百木氏（三井昭研）、中尾氏（大島造船所）、人位氏（大島造船所）、ハッサン氏（NK）、孟氏（上海交通大学）、段氏（上海交通大学）、岩下氏（SSK）を指導しました。また科研費をいただき、代表者として「スーパーバイザ制御理論を用いたバーチャルファクトリの開発」、「Max-Plus代数システム表現に基づく船舶生産システムのスケジューリング」、「閉ループ同定アプローチによる船舶操縦性能推定に関する研究」、「渦励振ロックイン領域同定のためのクロスフロー・インライン間連成運動モデルの構築」、分担者として「深海掘削船のリエントリ時操船訓練シミュレータおよび操船支援システムの開発研究」などの研究を実施しました。これらの研究を通して「制御法則を物理の言葉で説明する必要がある」ことを自覚し、退職後はこれを意識した制御工学のテキストの執筆を行ってみたいと考えています。一方、退職まであと4か月となった現時点で「造船工程計画の新アプローチ」を用いて造船6社と共同研究を行っております。これは私の専門性に基づいてMax-Plus法（H27年度日本船舶海洋工学会論文賞受賞）、Heap法と試行錯誤を繰り返しながら到達したもので、恐らくどの造船所でも有力な手法となるとの予感があり、退職までにその証左を得たいと思っています。

さて、教室運営についても記しておきたいと思います。まず当研究室の准教授として東工大から機械学習、特に強化学習がご専門の木村先生においでいただきました。システム工学の重要な要素技術として「最適化」があり、これをご教授いただき、また流体・構造・艤装の各分野との有効な協力関係を期待したからです。現時点では配管設計で成果を挙げておられます。木村先生には平成29年12月から大島造船所による寄付講座教授にご就任いただきました。伝統ある3講座をお借りしていたことになる私と木村先生は、一定の役割を果たすことができたか気になっております。

退職の辞（「吾」掲載の元原稿）

つぎに私は在職中に教室主任を5回拝命しました。ここ数年は私が最年長となり、教室運営上の重要課題への対応に追われていました。それは教員の平均年齢が50歳余りと高齢化しているにも拘わらず補充できない状況を打破するための「大学活性化制度」への応募と、研究大学として必須の「博士課程充足率」の向上でした。前者は定員管理から人事ポイント管理への移行に伴い導入されたもので、組織の改革を行えば新しく人事ポイントを与えるという、文科省が自律的な改革制度として高く評価している仕組みです。当教室は造船学を基礎として海洋工学にも教育研究の幅を広げるという方針のもとで、NKのご支援を得て「海洋エネルギー資源共同研究部門」を設立し、スーパー型洋上風力発電で実績のある宇都宮先生においでいただきました。その後、篠田教授、吉川教授のご尽力により造船大手3社から寄付講座をいただき、若手教員のポストの確保ができつつあります。後者に関して、平成22、23年度、九大は8大学（旧7帝大+東工大）の工学部長懇談会の幹事校となり、私は国際戦略分科会の主査を務めました。この経験を基に工学部短期留学プログラムELEPの立ち上げに協力し、また専門以外の唯一の論文「工学分野のイノベーションを牽引するエコシステムの社会実装」を執筆しました。当教室は学部成績と修論審査のトップにそれぞれ野中賞と渡辺賞を授与しております。野中先生は若い頃、「将来の日本に造船業が不可欠だ」との思いから造船学を目指されたとのこと、それでは少子化が顕著になってきた現在の日本はどのような世界的な立ち位置が望まれるのでしょうか。私は上記論文から「新興国の優秀な人材を日本人学生と切磋琢磨させながら教育し、将来にわたって連携させること」が、日本が取り得る選択肢の一つだと思っております。もしこれを当教室で実践するとしたら、何をすべきか考えておりましたら時間切れとなりました。永年お世話になり、本当にありがとうございました。末筆ながら造船学教室のご発展をお祈りしております。

Control Technologies for Ocean Engineering

Control technologies as the second axis

Kyushu University
Prof. H.Kajiwara
(2011.11.18, at PNU)

59] Prof. Hiroyuki Kajiwara

He was born in 1952 in Japan.

He received the B.S. degree in Engineering from Kyushu Institute of Technology in 1975, the M.S. and Ph.D. degrees in Engineering from Tokyo Institute of Technology in 1977 and 1985 respectively.

He was a research assistant at Tokyo Institute of Technology, 1977-1982, and an associate professor at Okayama University, 1982-1990, and at Kyushu Institute of Technology, 1990-1999. Since 1999, he has been a professor at Kyushu University, in the dept. of marine systems engineering.

Outline

1 **LQI Control**

Linear-Quadratic-Integral Design of Linear-Time-Invariant Control

2 **LPV Control**

Linear-Matrix-Inequality Based Design of Linear-Parameter-Varying Control

Applications

3 Underwater Vehicle

4 Flexible Riser

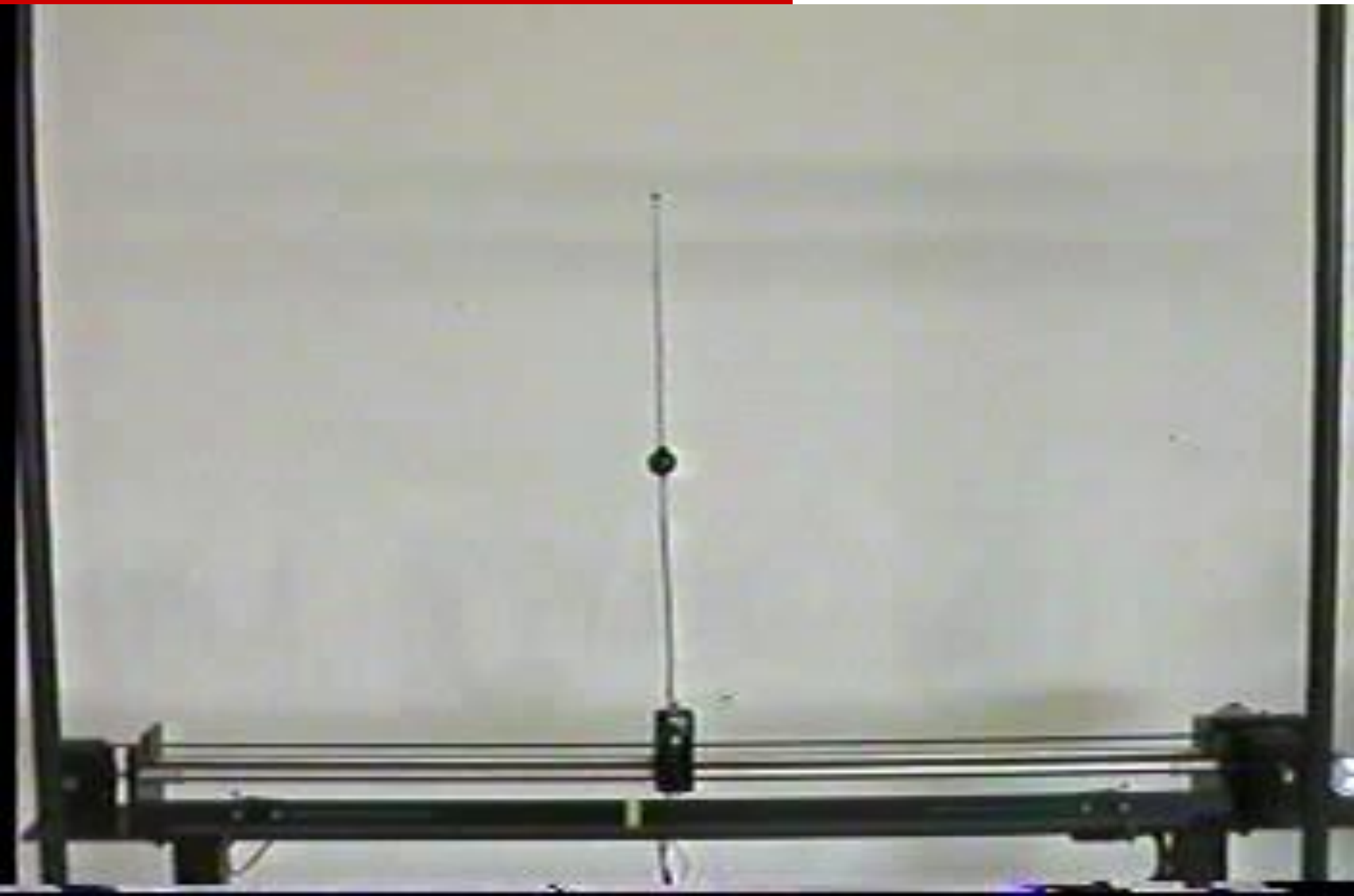
5 Azimuth thrusters

6 Nomoto's Model

7 Wind Turbine

Double Inverted Pendulum (1979)^[161]

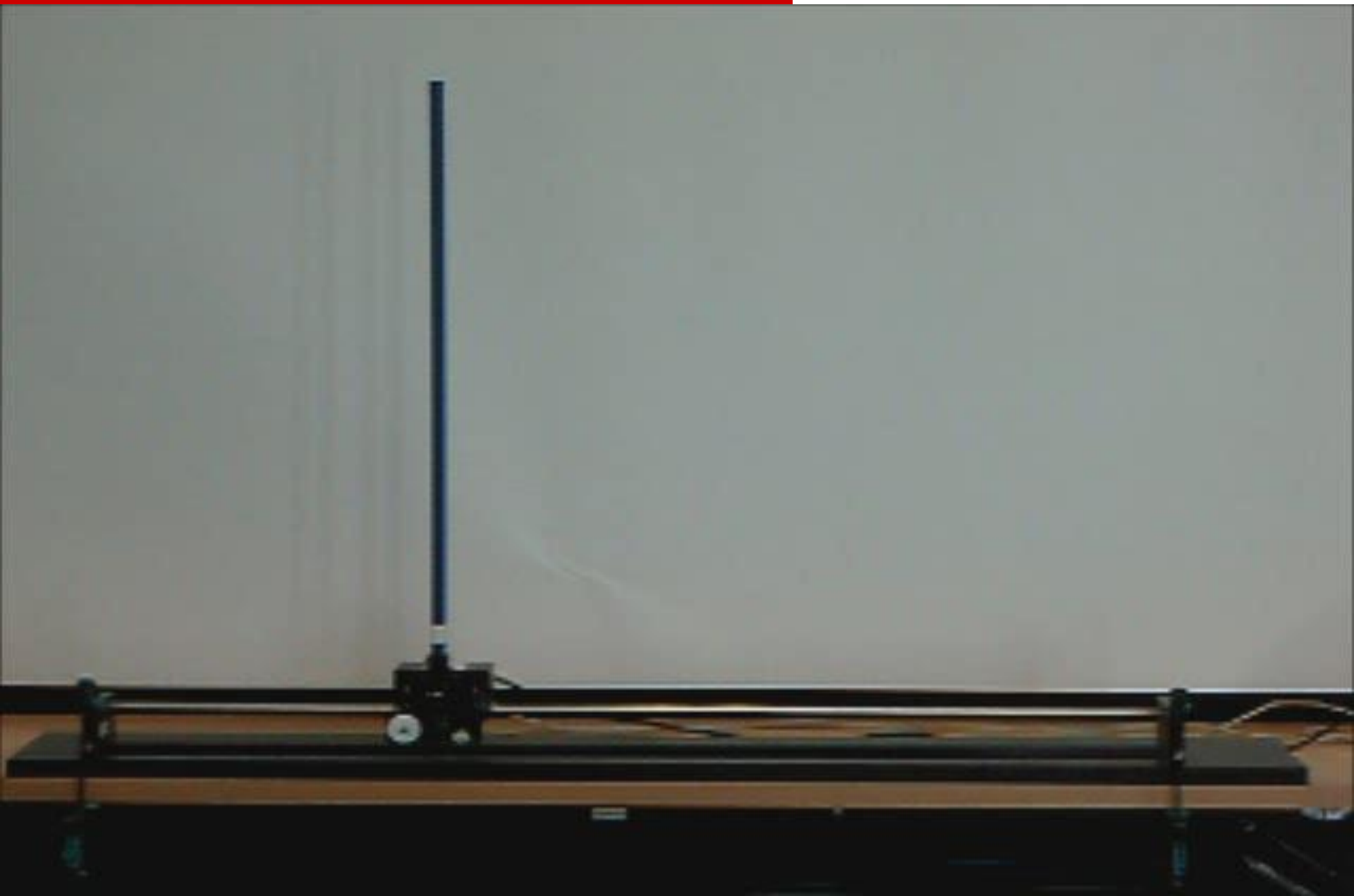
1



Inverted Pendulum (IP)

[162]

1

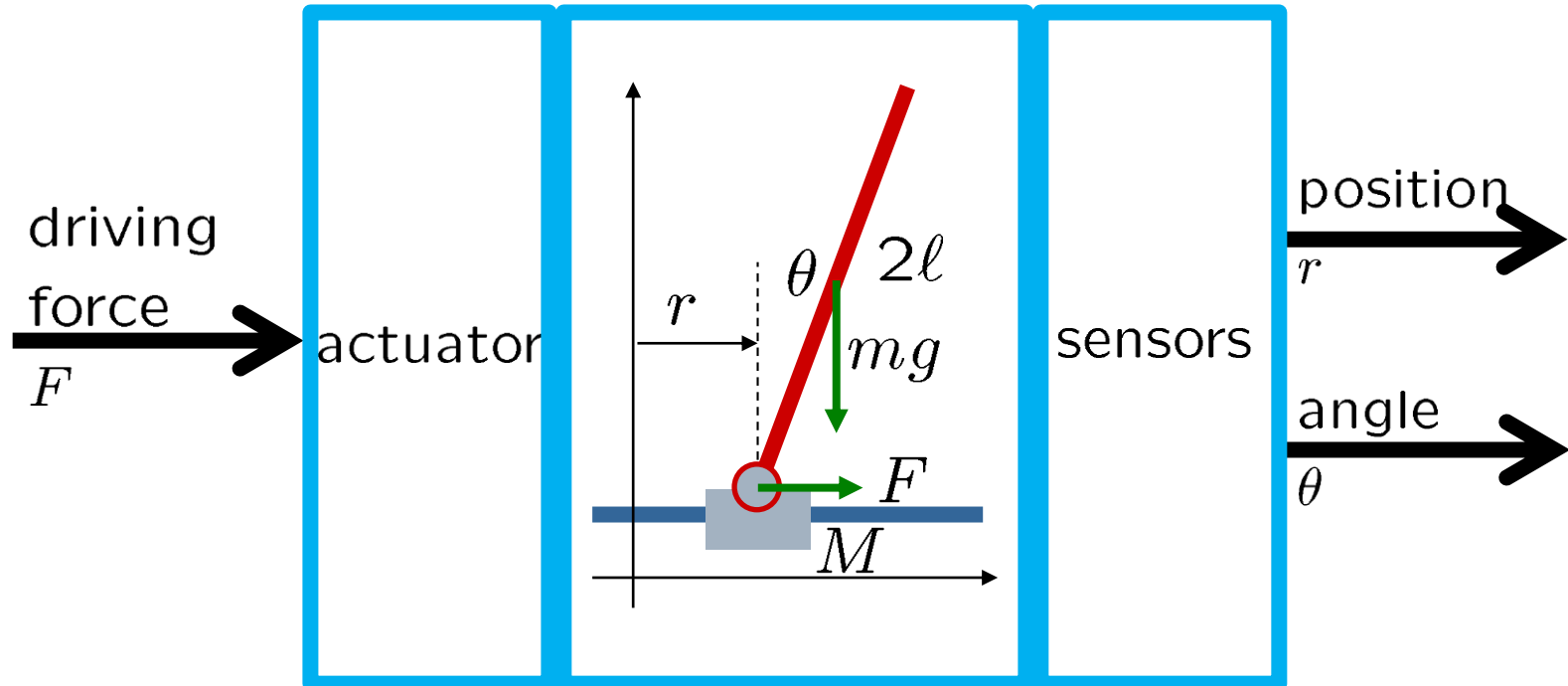


Inverted Pendulum

manipulated
variable

state variables
 $r, \theta, \dot{r}, \dot{\theta}$

measured
variables

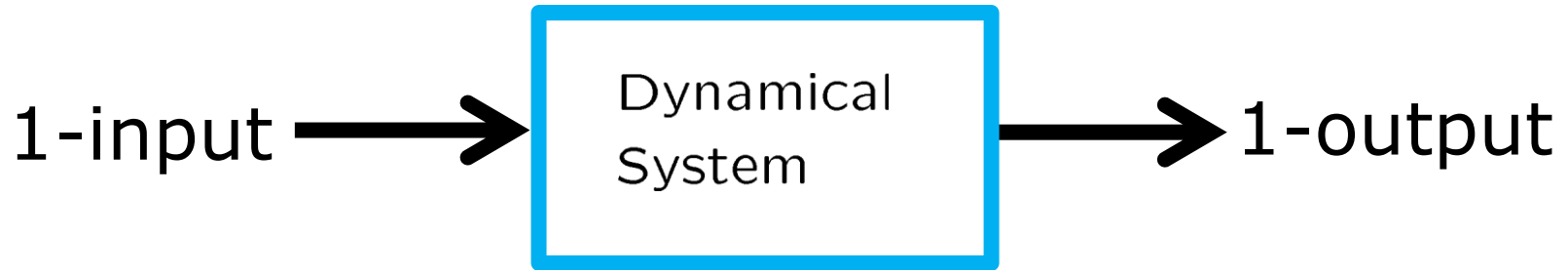


$$\underbrace{\begin{bmatrix} M + m & ml \cos \theta \\ ml \cos \theta & \frac{4}{3} ml^2 \end{bmatrix}}_{M(\xi_1)} \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix}}_{\xi_2} + \underbrace{\begin{bmatrix} -ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix}}_{C(\xi_1, \xi_2)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ -mlg \sin \theta \end{bmatrix}}_{G(\xi_1)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{e_1} \underbrace{F}_{\zeta}$$

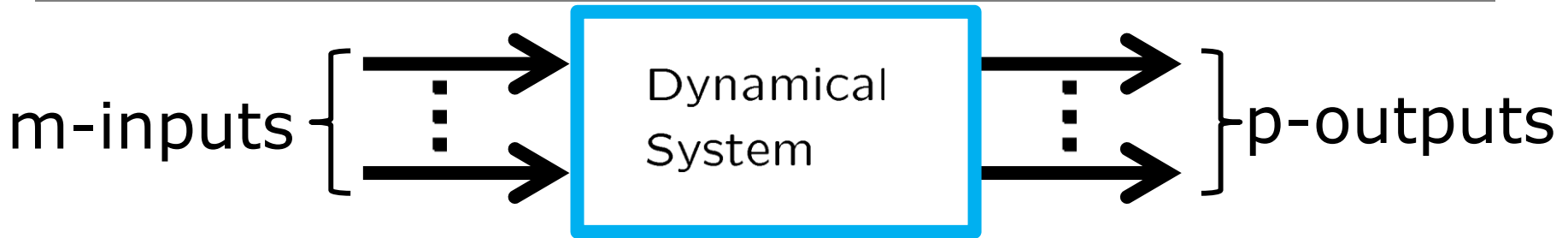
Under-actuated System

Under-actuated System

SISO (Single-Input Single-Output) System



MIMO (Multi-Input Multi-Output) System



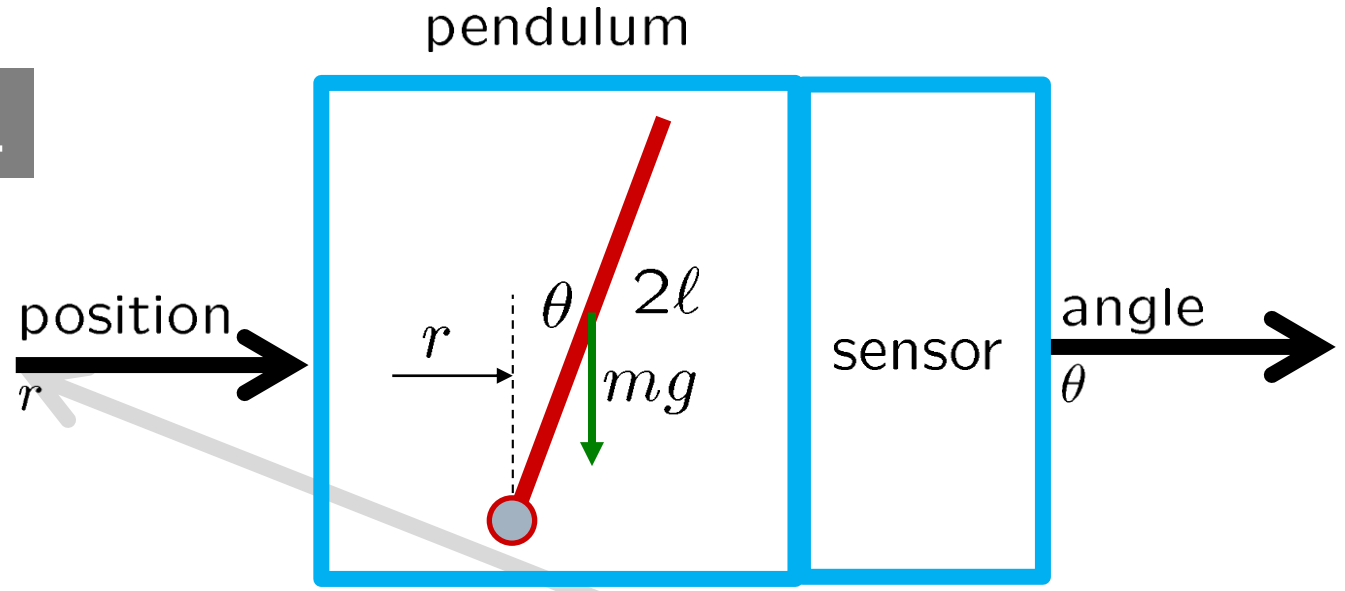
$m < p \Rightarrow$ Under-actuated System

controlled variables as many as manipulated
m-variables based on measured p-variables

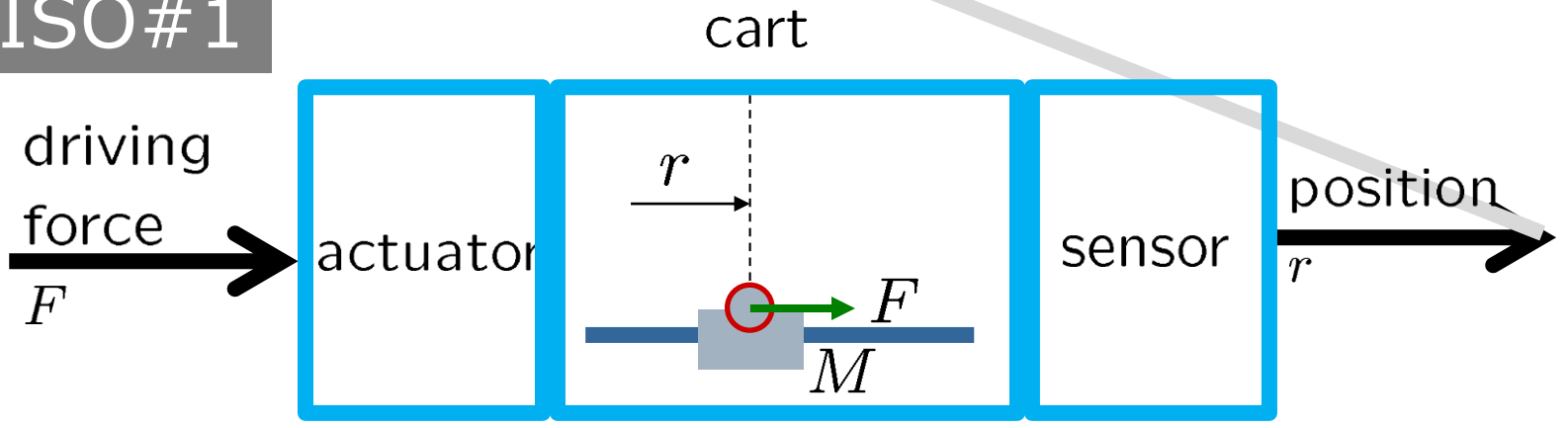
If you chase after two rabbits, you won't catch either.

Andersen's Approach

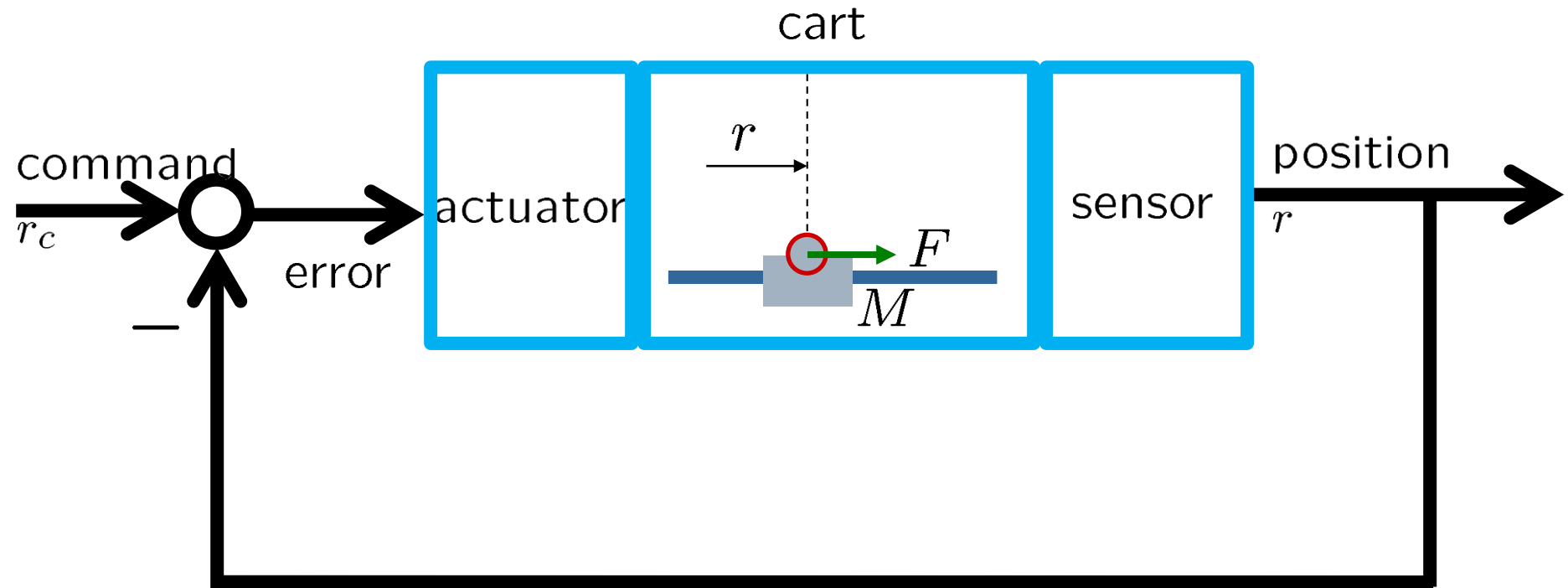
SISO#2



SISO#1



Position Control of a Cart

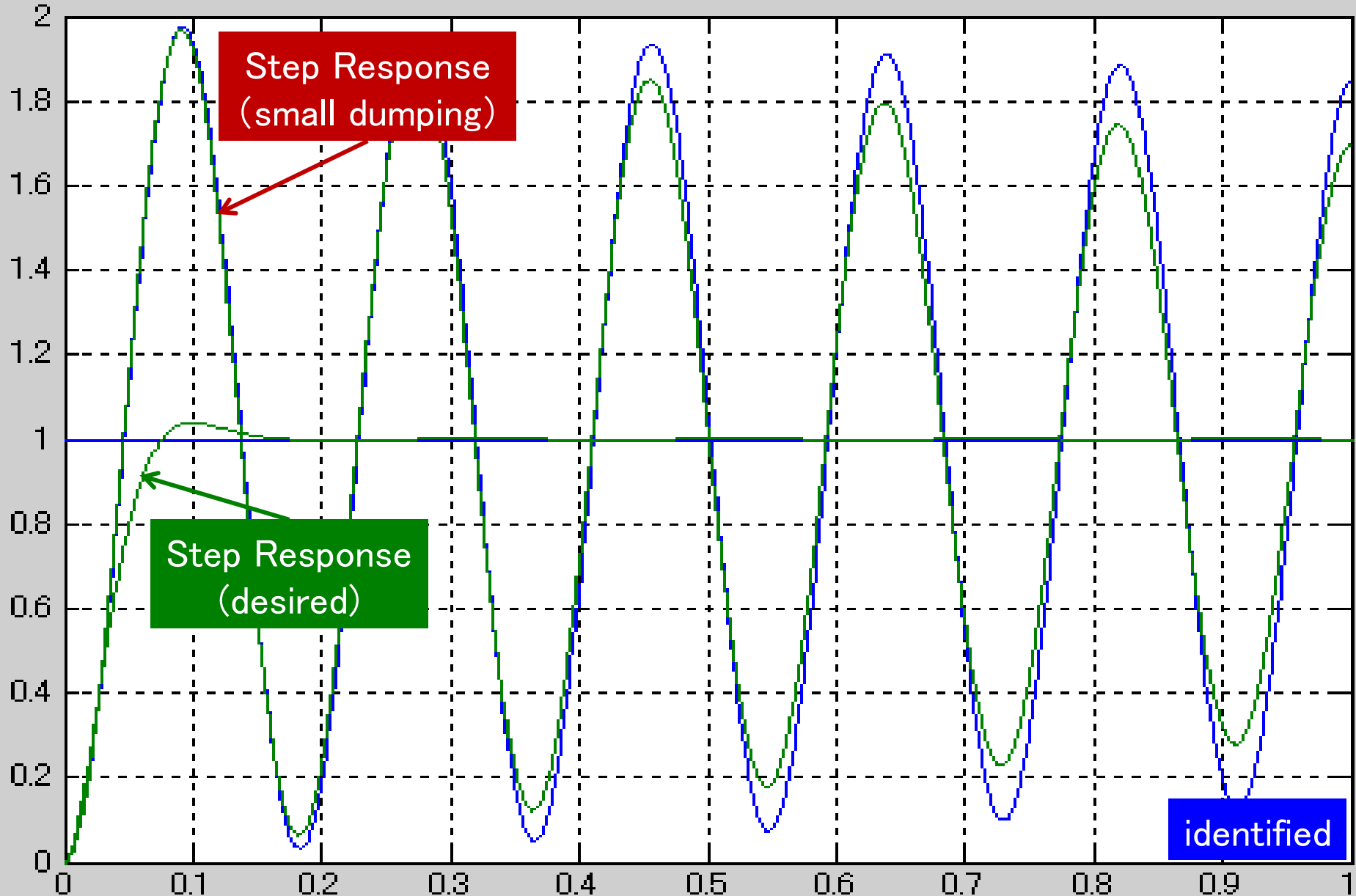


Unity **feedback** is used to correct the error between given command and current position.

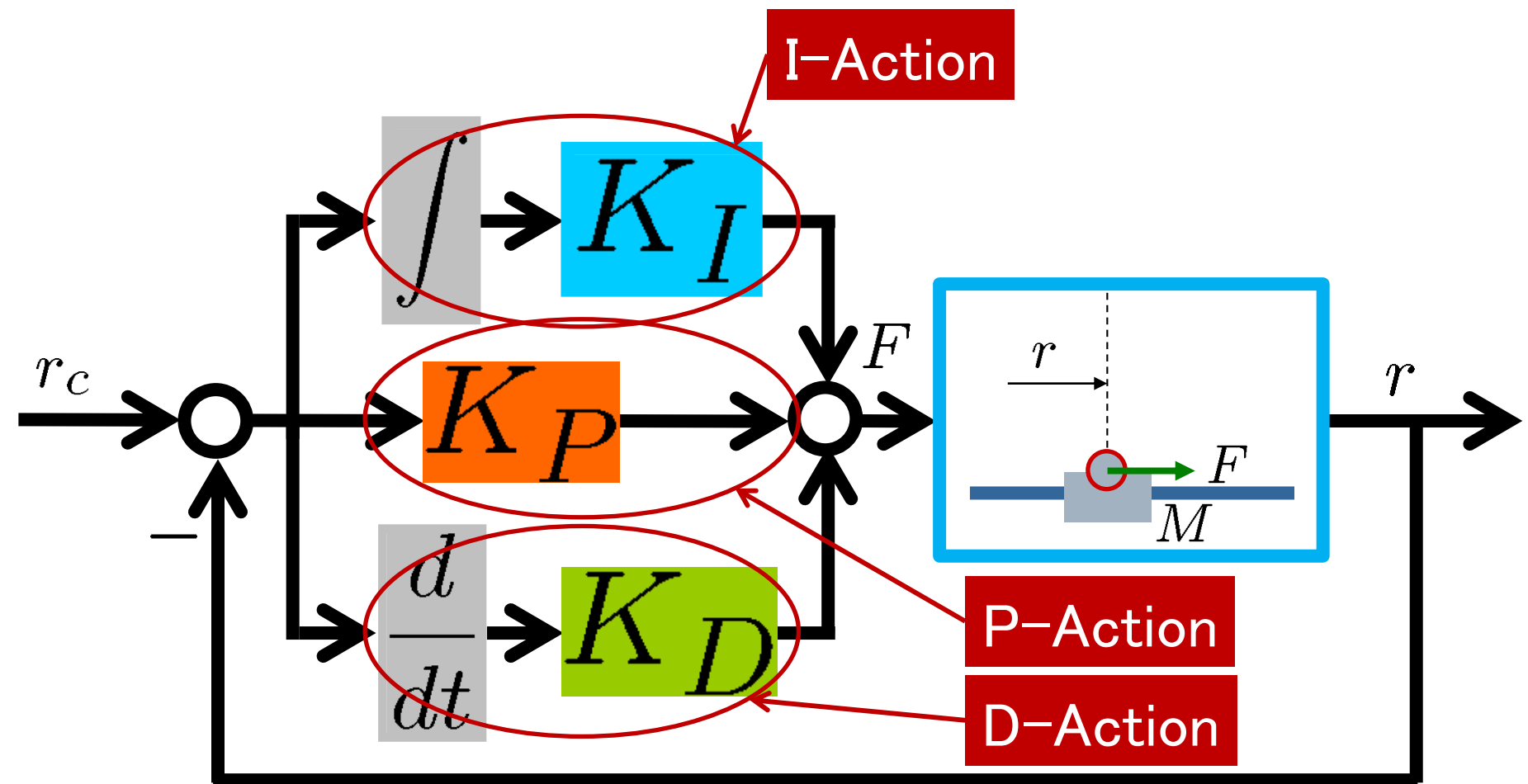
How to Regulate the Oscillation?

[167]

1

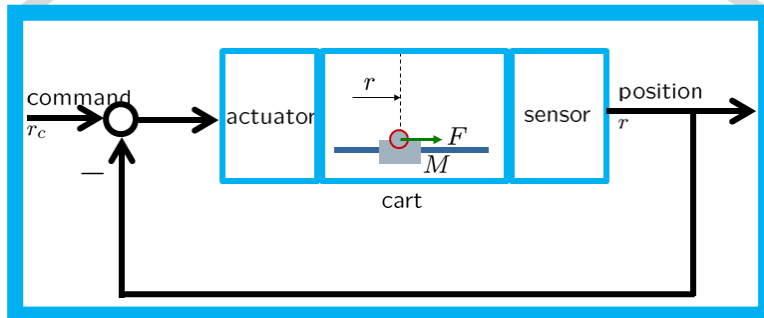
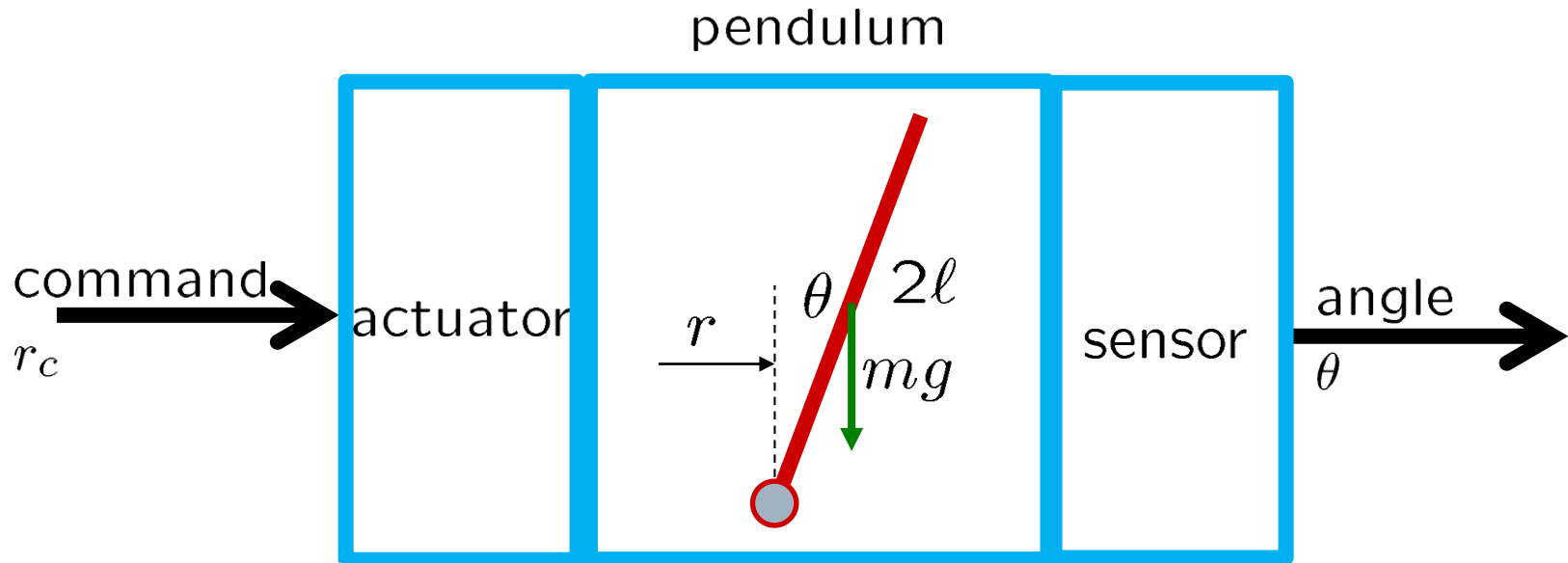


PID Control of a Cart (Motor/Ship) ^[168] 1



Which action regulates the oscillation?

Andersen's Approach (Step 1)



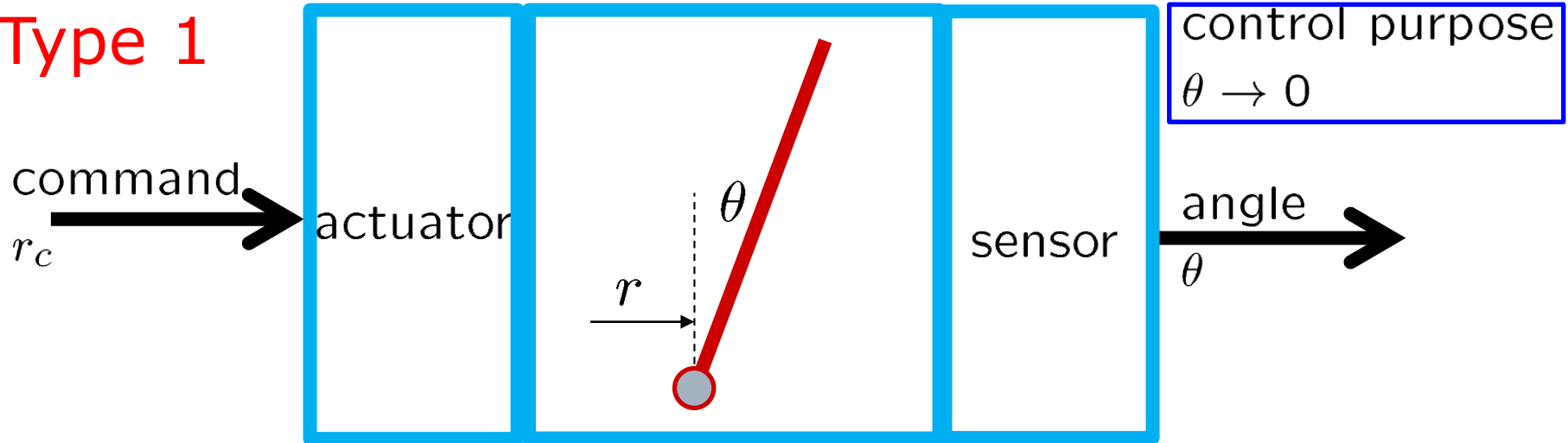
Position Controlled Cart

$$\frac{d}{dt}\dot{r} = -\frac{1}{T_a}\dot{r} + \frac{K_a}{T_a}\dot{r}_c$$

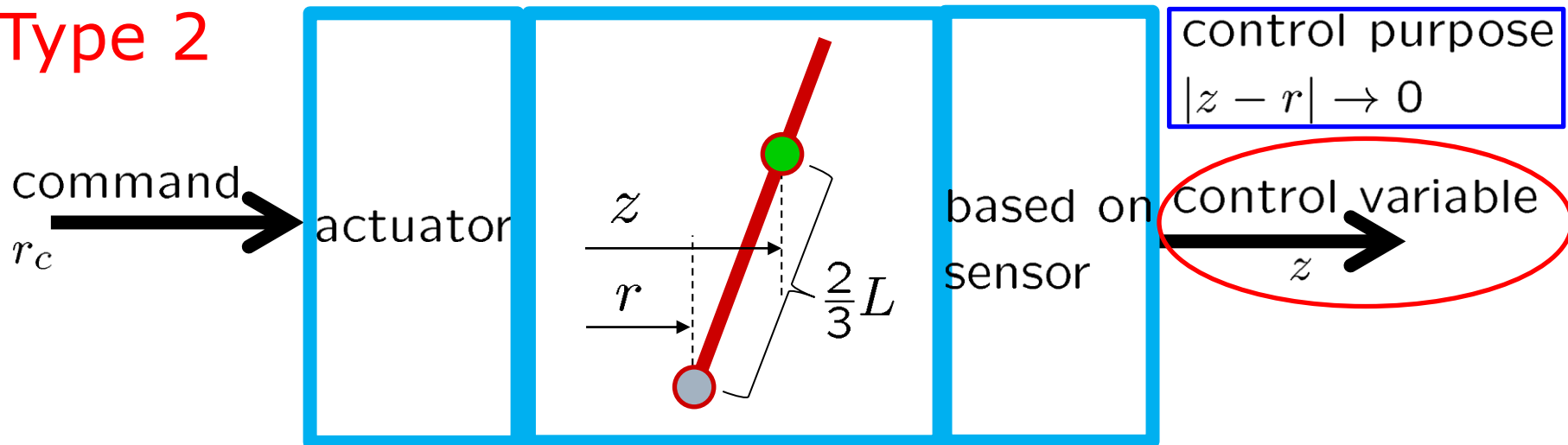
Which is easier to control?

pendulum

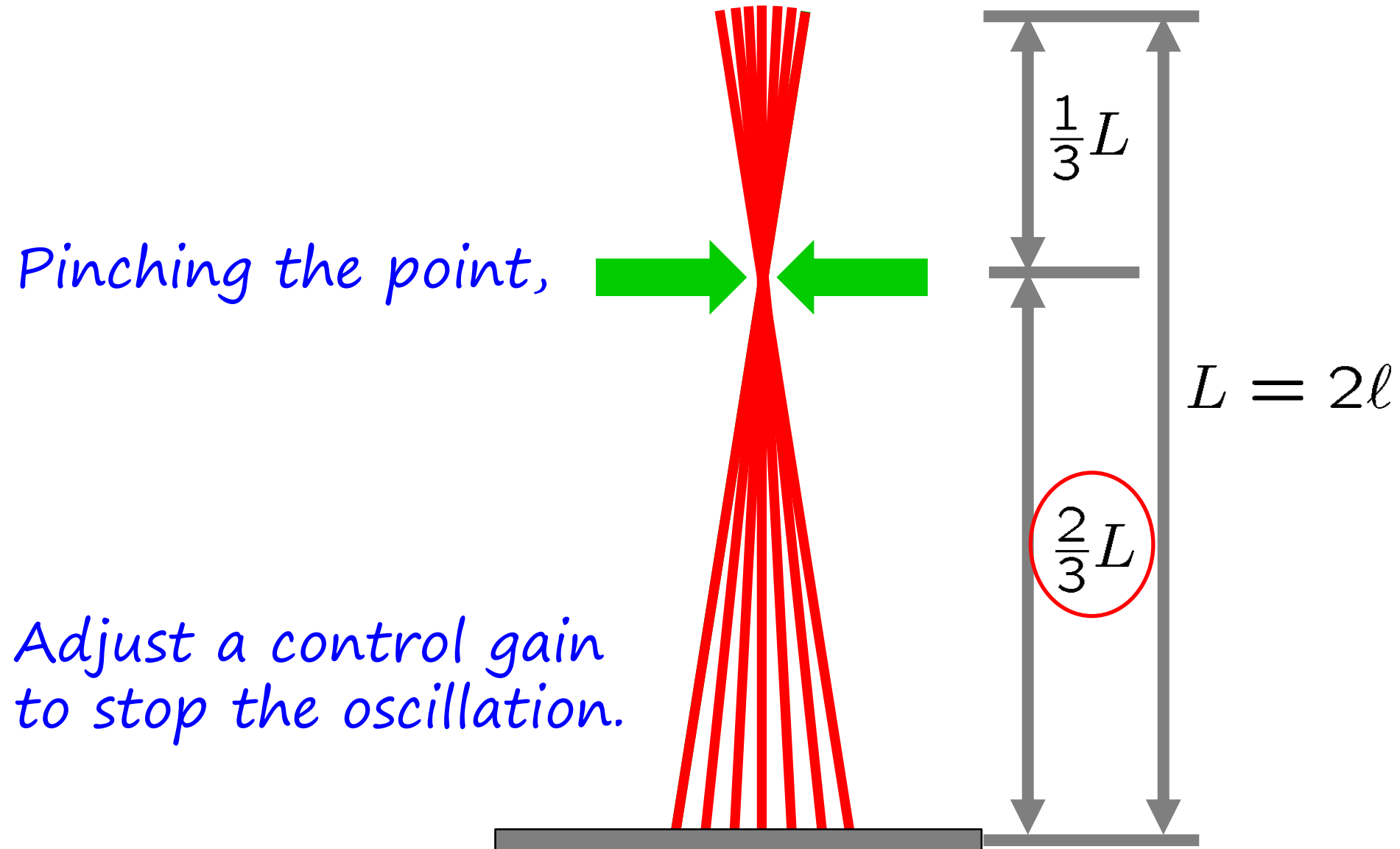
Type 1



Type 2

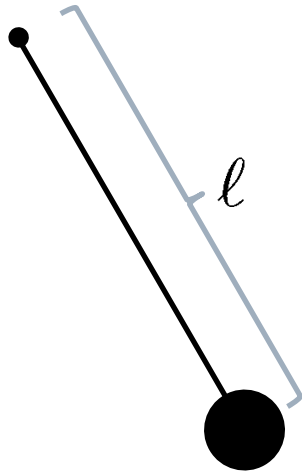


Andersen's Approach (Step 2)

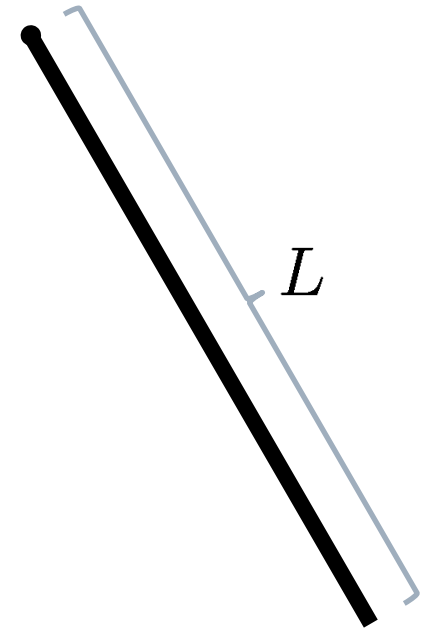


The Same Period of Pendulums

Simple Pendulum



Rigid Pendulum



$$l = \frac{2}{3}L$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{2L}{3g}}$$

Find the length l to realize the same period as the rigid pendulum.

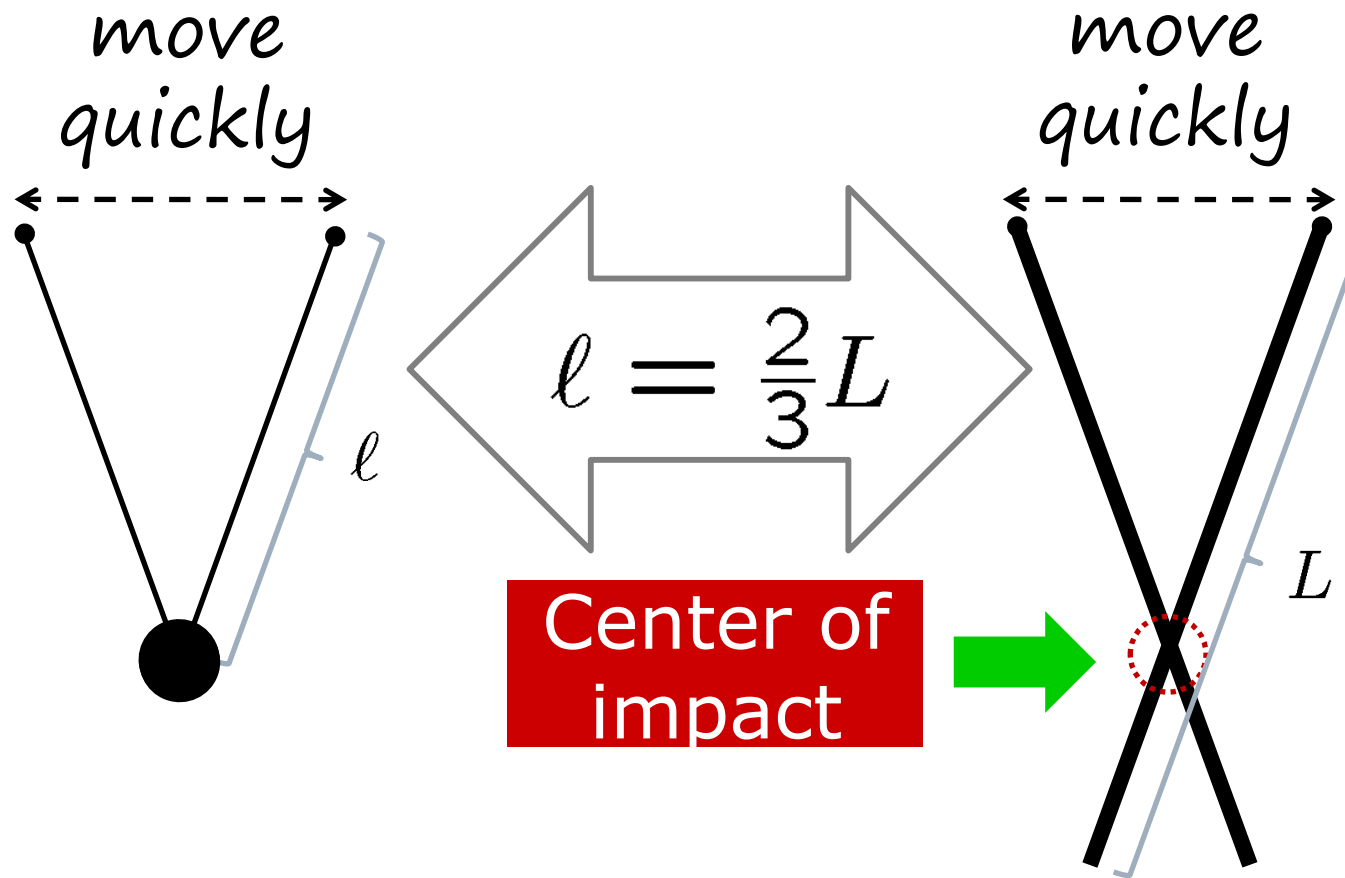
The Same Period of Pendulums

[173]

1



Center of Impact



The controlled variable should be such a *physically unmovable point*, what we call, a *node*.

Examples of Center of Impact



Hit a ball to get the minimum impact on hands.

Finding a Controlled Variable

$$\begin{cases} \cancel{(M + m)\ddot{r} + ml \cos \theta \ddot{\theta} - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta = F} \\ ml \cos \theta \ddot{r} + \frac{4}{3} ml^2 \ddot{\theta} = mgl \sin \theta \\ \Downarrow \cos \theta \simeq 1, \sin \theta \simeq \theta \end{cases}$$

$$\underbrace{\ddot{r} + \frac{4l}{3} \ddot{\theta}}_{\frac{d^2}{dt^2} \left(r + \frac{4l}{3} \theta \right)} = g\theta \Rightarrow \frac{\Theta(s)}{R(s)} = \frac{-\frac{3}{4l} s^2}{s^2 - \frac{3g}{4l}}$$

non-
minimum
phase

$$\Downarrow z = r + \frac{2}{3}(2l)\theta$$

$$\ddot{z} = \frac{3g}{4l}(z - r) \Rightarrow \frac{Z(s)}{R(s)} = \frac{-\frac{3g}{4l}}{s^2 - \frac{3g}{4l}}$$

minimum
phase

Velocity Input Model

- Motion equation

$$\ddot{z} = \frac{3g}{4l}(z - r), \quad \frac{d}{dt}\dot{r} = -\frac{1}{T_a}\dot{r} + \frac{K_a}{T_a}\dot{r}_c$$

- State equation

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \ddot{z} \\ \dot{r} \\ \ddot{r} \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{3g}{4l} & 0 & -\frac{3g}{4l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_a} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ r \\ \dot{r} \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_a}{T_a} \end{bmatrix}}_B \underbrace{\dot{r}_c}_u$$

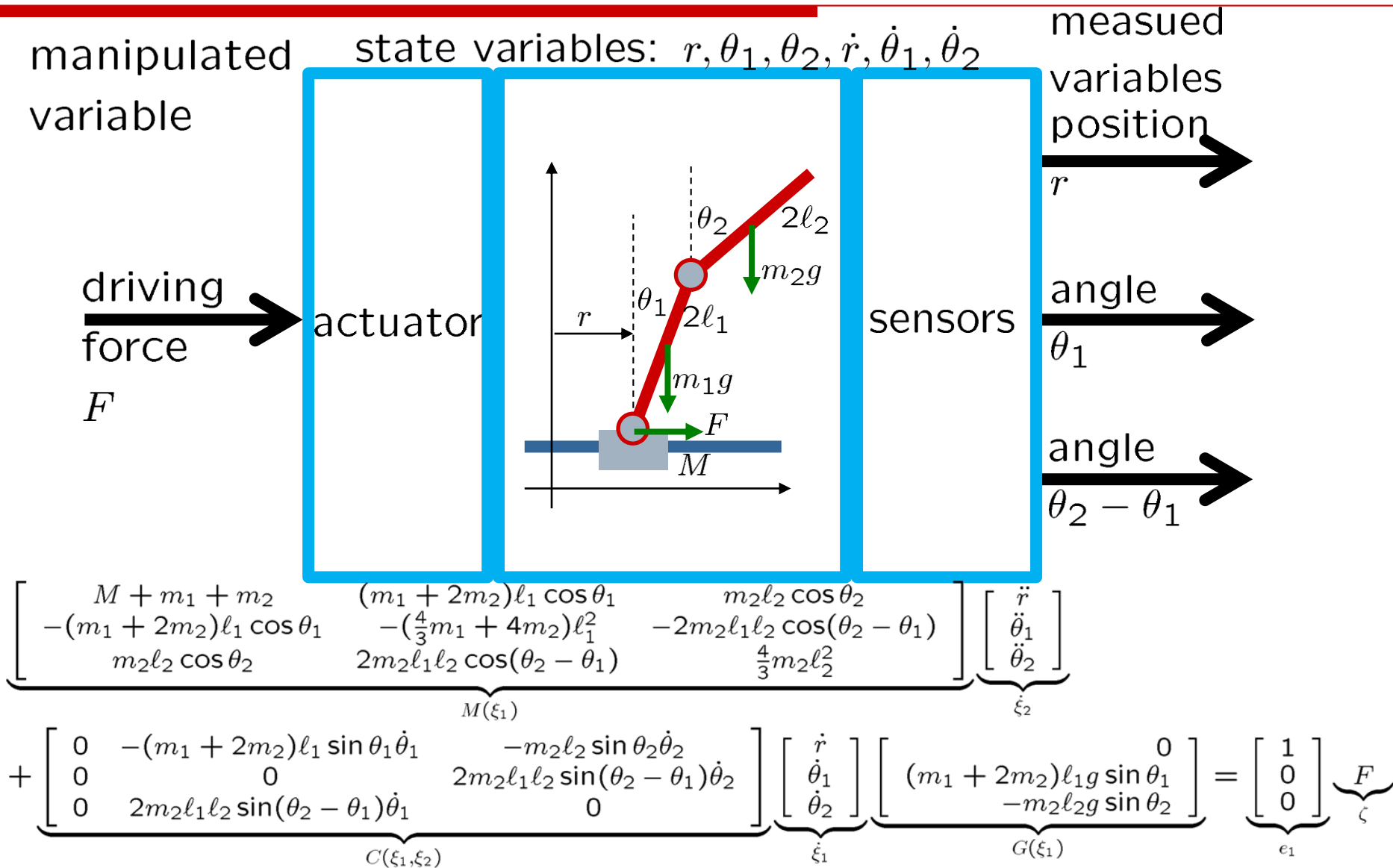
- Output equation

$$\underbrace{\begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix}}_y = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{3}{4l} & 0 & -\frac{3}{4l} & 0 \end{bmatrix}}_{C_M} \underbrace{\begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ r \\ \dot{r} \end{bmatrix}}_x$$

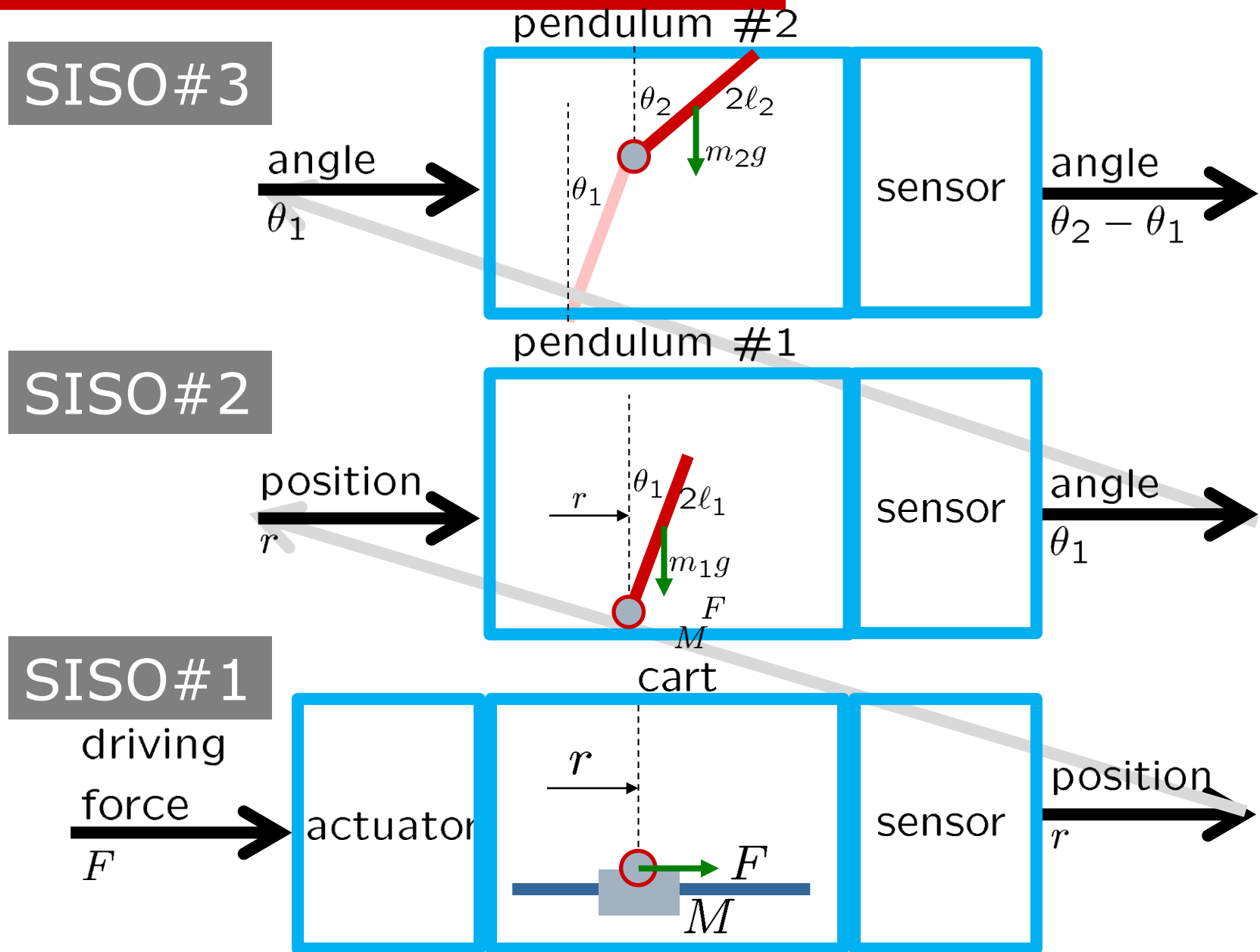
velocity
input

This model is obtained as a sub-product.
But the usefulness will be noticed later.

Double Inverted Pendulum



Andersen's Approach

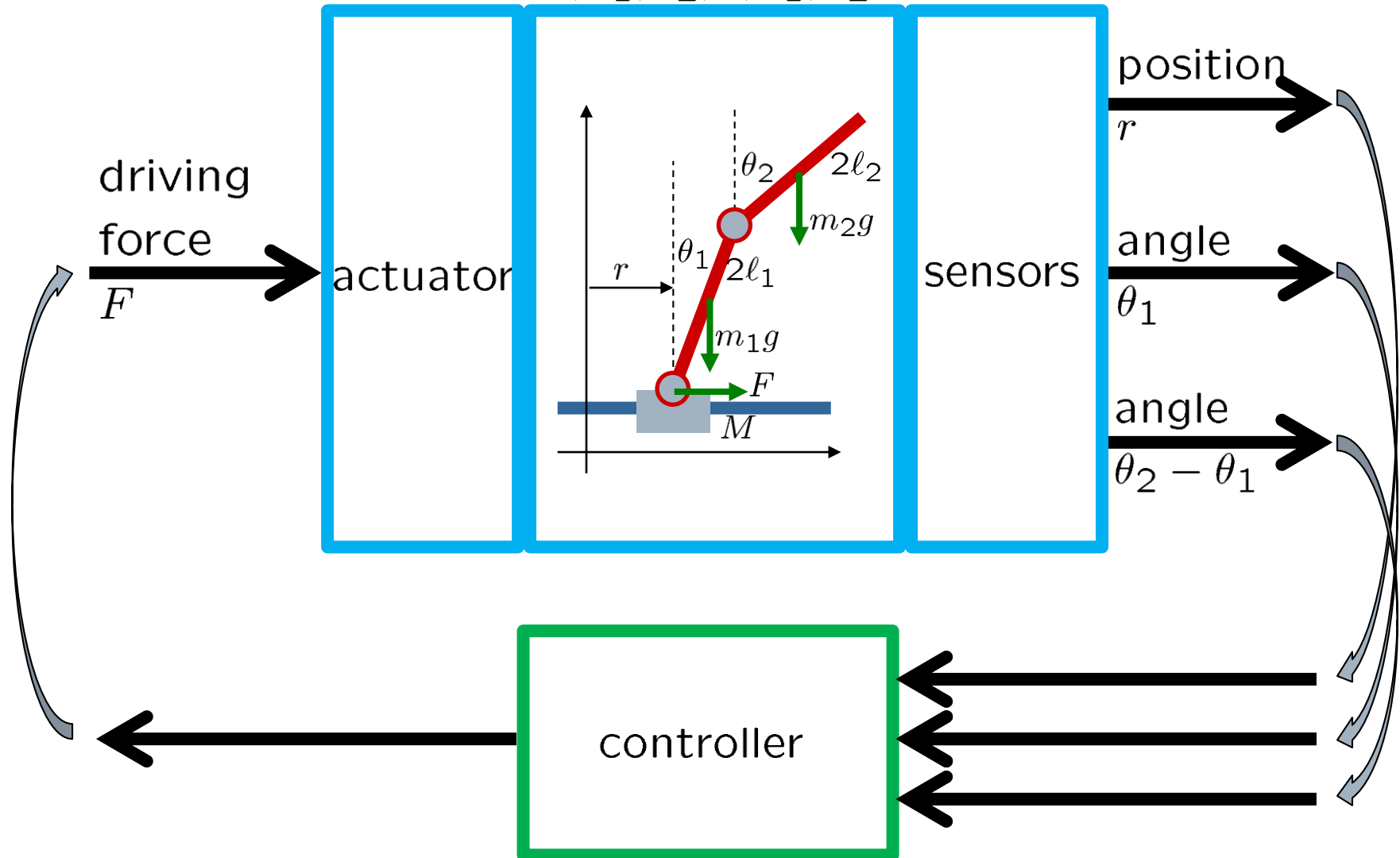


Control System for DIP

manipulated
variable

state variables
 $r, \theta_1, \theta_2, \dot{r}, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$

measured
variables



LTI Model for DIP

- State Equation ($l_1 = l_2 = l, m_1 = m_2 = m$)

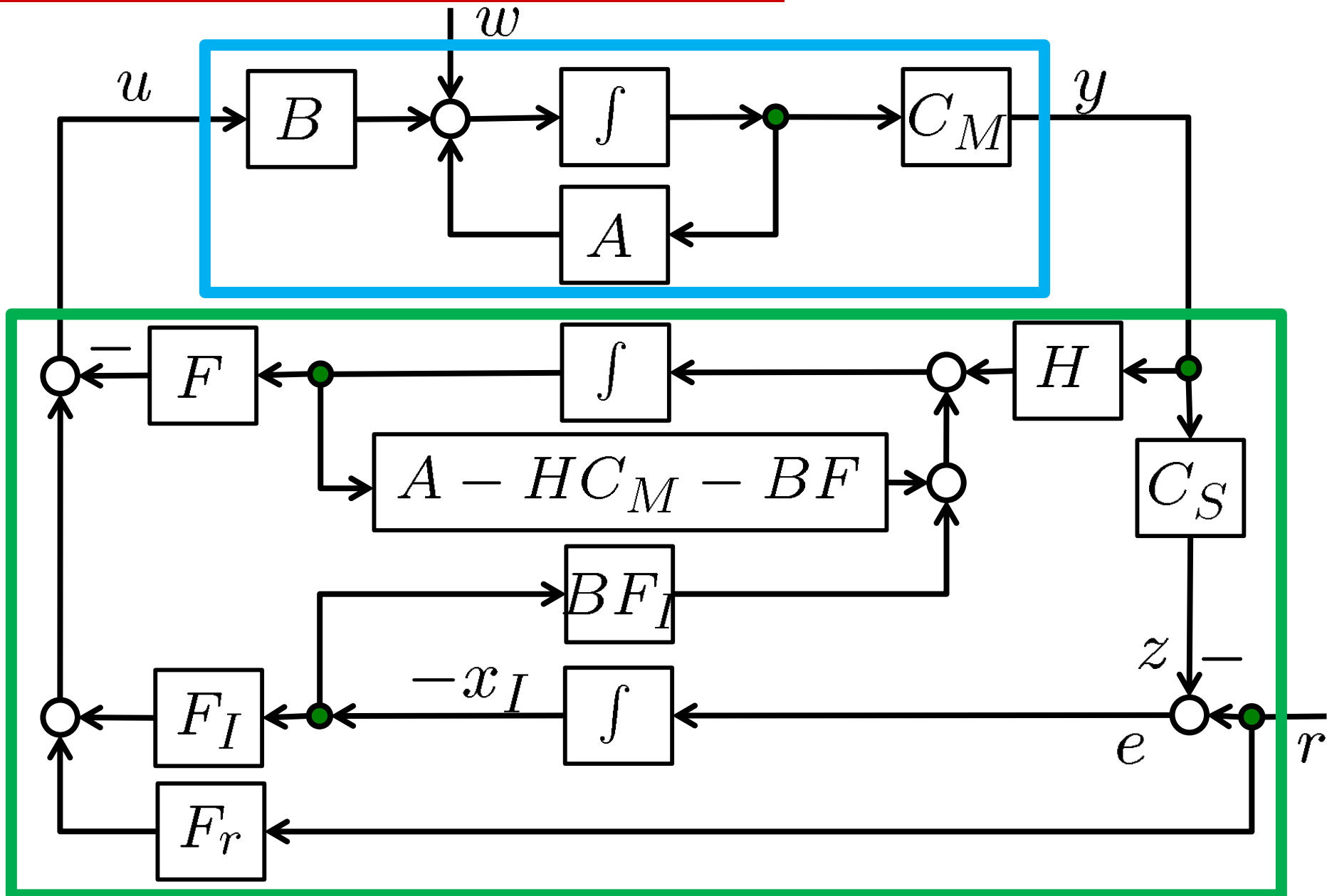
$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x = \begin{bmatrix} r & \theta_1 & \theta_2 & \dot{r} & \dot{\theta}_1 & \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}, \quad u = F$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{18gm}{7M+2m} & \frac{3gm}{14M+4m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12gM+15gm}{7e11M+2e11m} & -\frac{18gM+9gm}{28e11M+8e11m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{18gM+9gm}{7e11M+2e11m} & \frac{48gM+15gm}{28e11M+8e11m} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{7}{7M+2m} \\ -\frac{9}{14e11M+4e11m} \\ \frac{3}{14e11M+4e11m} \end{bmatrix}$$

- Output Equation

$$y = C_M x, \quad y = \begin{bmatrix} r \\ \theta_1 \\ \theta_2 - \theta_1 \end{bmatrix}, \quad C_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

LTI Control by LQI Design Method [184]



OBC with an I-Action

- Controllable and Observable System

$$\dot{x} = Ax + Bu + w, \quad y = C_M x$$

where w is a constant disturbance.

- Control Purpose (Controlled Variables)

$$z = C_S y = \underbrace{C_S C_M}_C x \rightarrow r \quad (t \rightarrow \infty)$$

- Assumption: $S = \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix}$ is nonsingular.

For any w, r , there exist x_∞, u_∞ ,

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\infty \\ u_\infty \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -w \\ r \end{bmatrix}$$

- Observer-Based Controller with an I-Action

$$\dot{\hat{x}} = (A - HC_M - BF)\hat{x} - BF_I x_I + Hy$$

$$\dot{x}_I = z - r$$

$$u = -F\hat{x} - F_I x_I$$

Steady State Analysis

- Stabilized Closed-loop System

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_I \\ \dot{e} \end{bmatrix}}_{\dot{x}'_E} = \underbrace{\begin{bmatrix} A - BF & -BF_I & -BF \\ C & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & A - HC_M \end{bmatrix}}_{A'_{EF}} \underbrace{\begin{bmatrix} x \\ x_I \\ e \end{bmatrix}}_{x'_E} + \underbrace{\begin{bmatrix} w \\ -r \\ -w \end{bmatrix}}_{w'_E}$$

- Steady State

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x \\ x_I \\ e \end{bmatrix}}_{x'_E} \rightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} A_{EF}^{-1} & -A_{EF}^{-1} \begin{bmatrix} BF \\ 0 \end{bmatrix} \hat{A}^{-1} \\ \hline 0 & \hat{A}^{-1} \end{bmatrix}}_{A'_{EF}^{-1}} \underbrace{\begin{bmatrix} -w \\ r \\ w \end{bmatrix}}_{-w'_E}$$

$$= \begin{bmatrix} x_\infty \\ \hline -F_I^{-1} F x_\infty - F_I^{-1} u_\infty - F_I^{-1} F e_\infty \\ e_\infty \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} z = Cx \rightarrow Cx_\infty = r \\ -F_I x_I \rightarrow F(x_\infty + e_\infty) + u_\infty \\ e \rightarrow e_\infty := \hat{A}^{-1} w \end{cases}$$

LQI Design Method (1)

- Step 1: Selection of Controlled Variables

Determine a selection matrix C_S such that

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \text{ is nonsingular } (C = C_S C_M).$$

- Step 2: Stabilization of the Error System

For the error system:

$$\frac{d}{dt} \underbrace{\begin{bmatrix} x - x_\infty \\ u - u_\infty \end{bmatrix}}_{x_{E3}} = \underbrace{\begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A_{E3}} \underbrace{\begin{bmatrix} x - x_\infty \\ u - u_\infty \end{bmatrix}}_{x_{E3}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix}}_{B_{E3}} \underbrace{\dot{u}}_{u_{E3}}$$

determine a stabilizing state feedback

$$\dot{u} = - \begin{bmatrix} K & K_I \end{bmatrix} x_{E3}$$

by minimizing a cost function

$$J = \int_0^\infty (x_{E3}^T Q_E x_{E3} + u_{E3}^T R_E u_{E3}) dt,$$

and then calculate

$$\begin{bmatrix} F & F_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & K_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix}^{-1}.$$

LQI Design Method (2)

- Step 3: Calculation of State Observer

To determine the gain H in a state observer

$$\dot{\hat{x}} = (A - HC)\hat{x} + Hy + Bu$$

by solving Riccati equation

$$\text{FARE} : \Gamma A^T + A\Gamma - \Gamma C^T V^{-1} C \Gamma + W = 0$$

on $\Gamma > 0$, and calculating

$$H = (C^T V^{-1} \Gamma)^T.$$

- Step 4: Calculation of LQI Controller

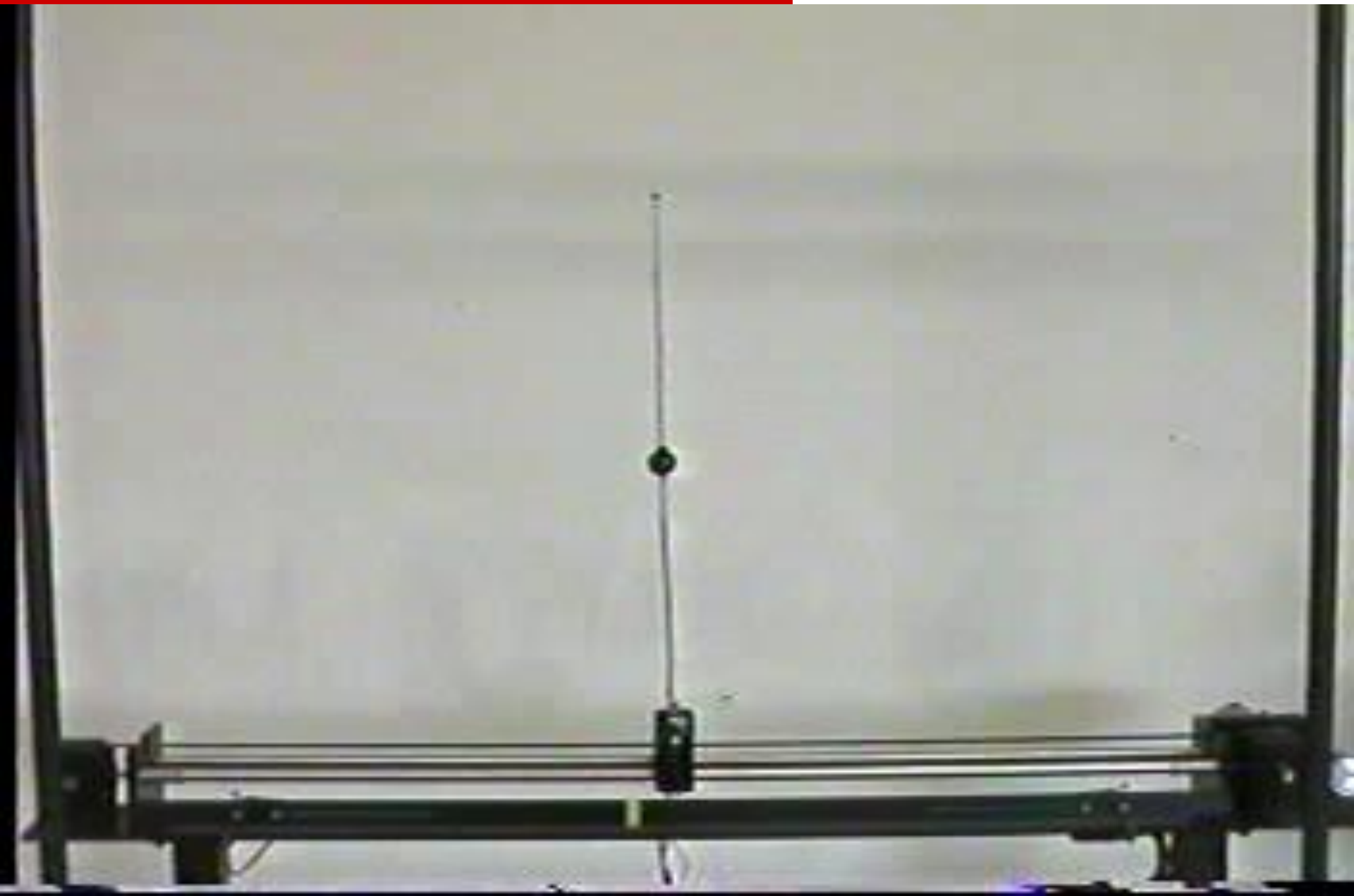
Base on C_S, F, F_I, H obtained, calculate

$$\dot{x}_K = \underbrace{\begin{bmatrix} A - HC_M - BF & -BF_I \\ 0_{m \times n} & 0_{m \times m} \end{bmatrix}}_{A_K} x_K + \underbrace{\begin{bmatrix} H & 0_{n \times m} \\ C_S & -I_m \end{bmatrix}}_{B_K} \begin{bmatrix} y \\ r \end{bmatrix}$$

$$u = - \underbrace{\begin{bmatrix} F & F_I \end{bmatrix}}_{C_K} x_K.$$

Double Inverted Pendulum (1979)^[189]

1



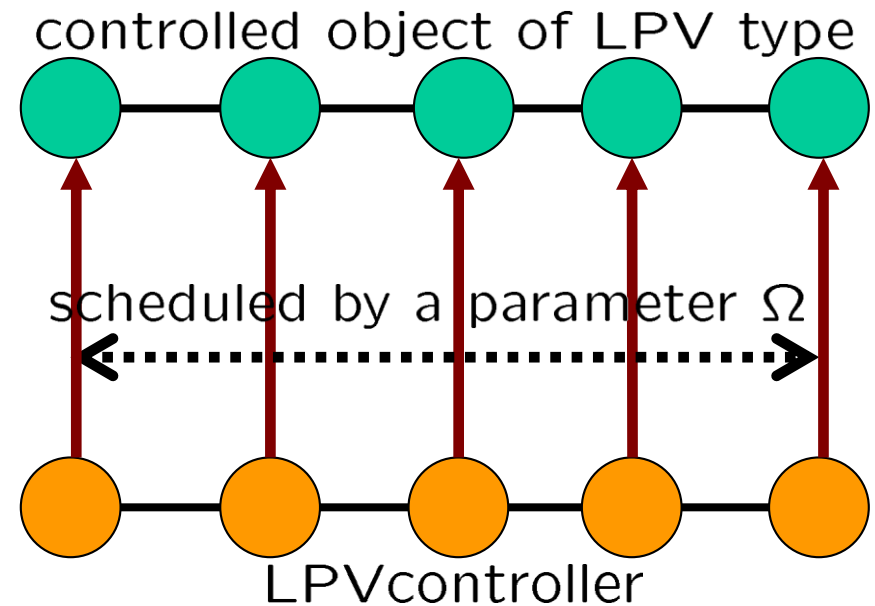
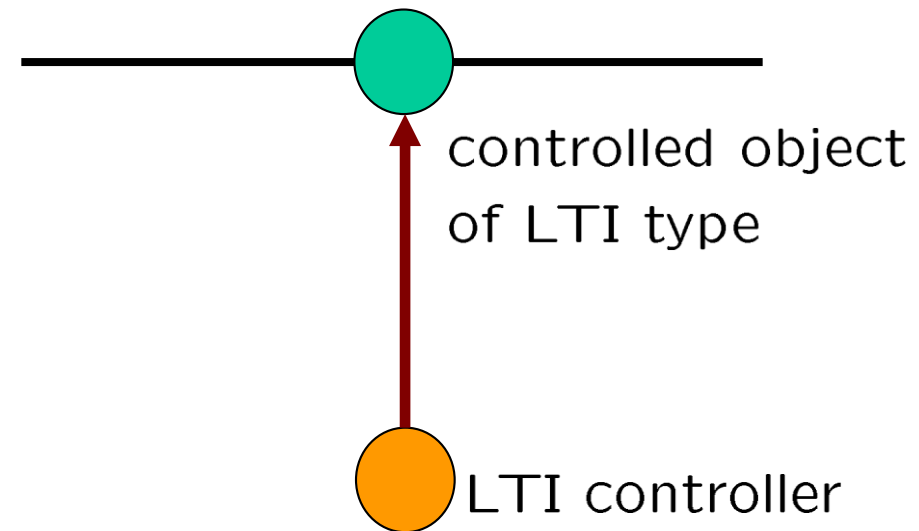
Outline

1 LQI Control

Linear-**Q**uadratic-**I**ntegral Design of Linear-Time-Invariant **C**ontrol

2 LPV Control

Linear-Matrix-Inequality Based Design of Linear-**P**arameter-**V**arying **C**ontrol

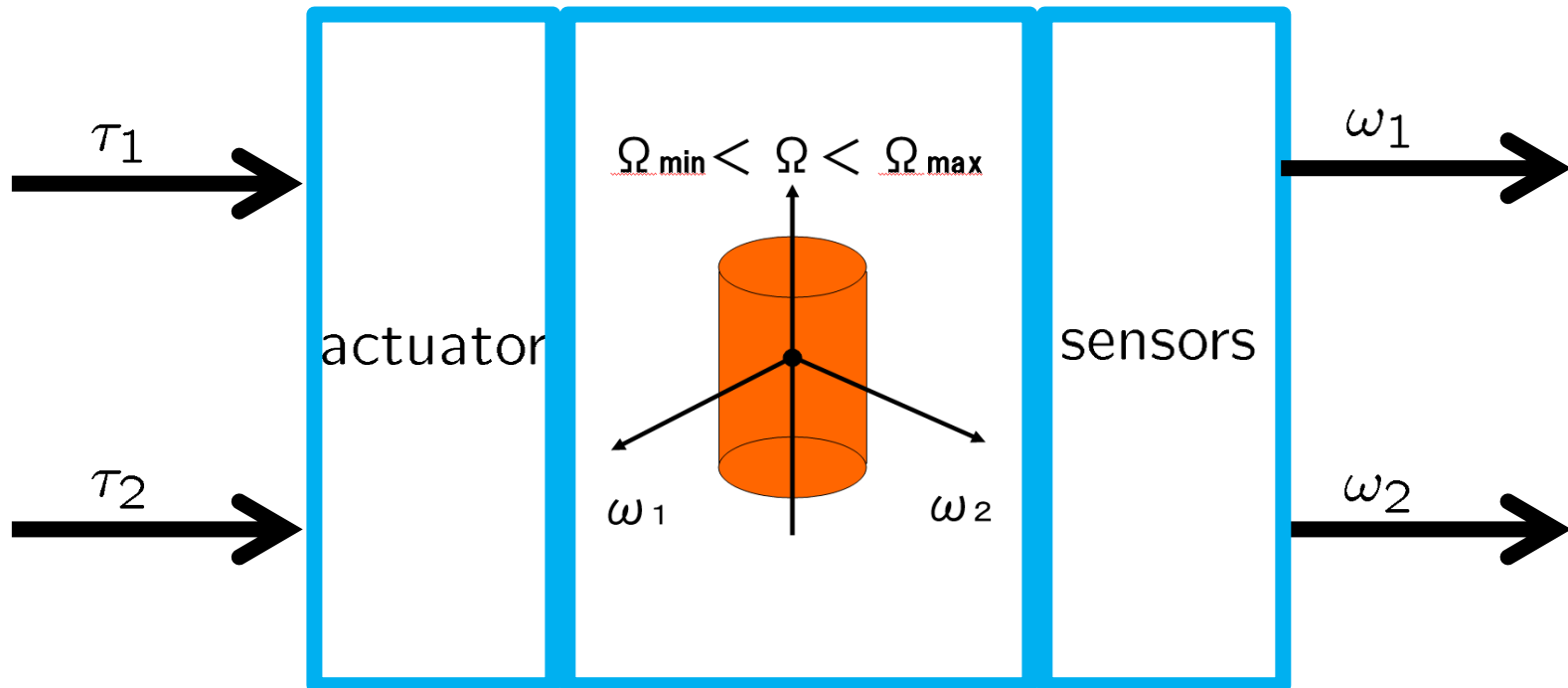


Spinning Body

manipulated
variables

state variables

measured
variables



$$\begin{cases} J_1 \dot{\omega}_1 - \omega_2 \Omega (J_1 - J_3) = \tau_1 \\ J_1 \dot{\omega}_2 - \omega_1 \Omega (J_3 - J_1) = \tau_2 \end{cases}$$

Under the z-angular velocity variation, regulate the disturbed x&y-angular velocities.

LPV Model

- State equation: **varying parameter**

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \end{bmatrix}}_{\dot{x}} = \underbrace{\Omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{J_1 - J_3}{J_1} \\ -\frac{J_1 - J_3}{J_1} & 0 \end{bmatrix}}_{A(\Omega)} \underbrace{\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\frac{1}{J_1}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}}_u$$

$$(\Omega_{min} \leq \Omega \leq \Omega_{max})$$

- Polytopic LPV Model:

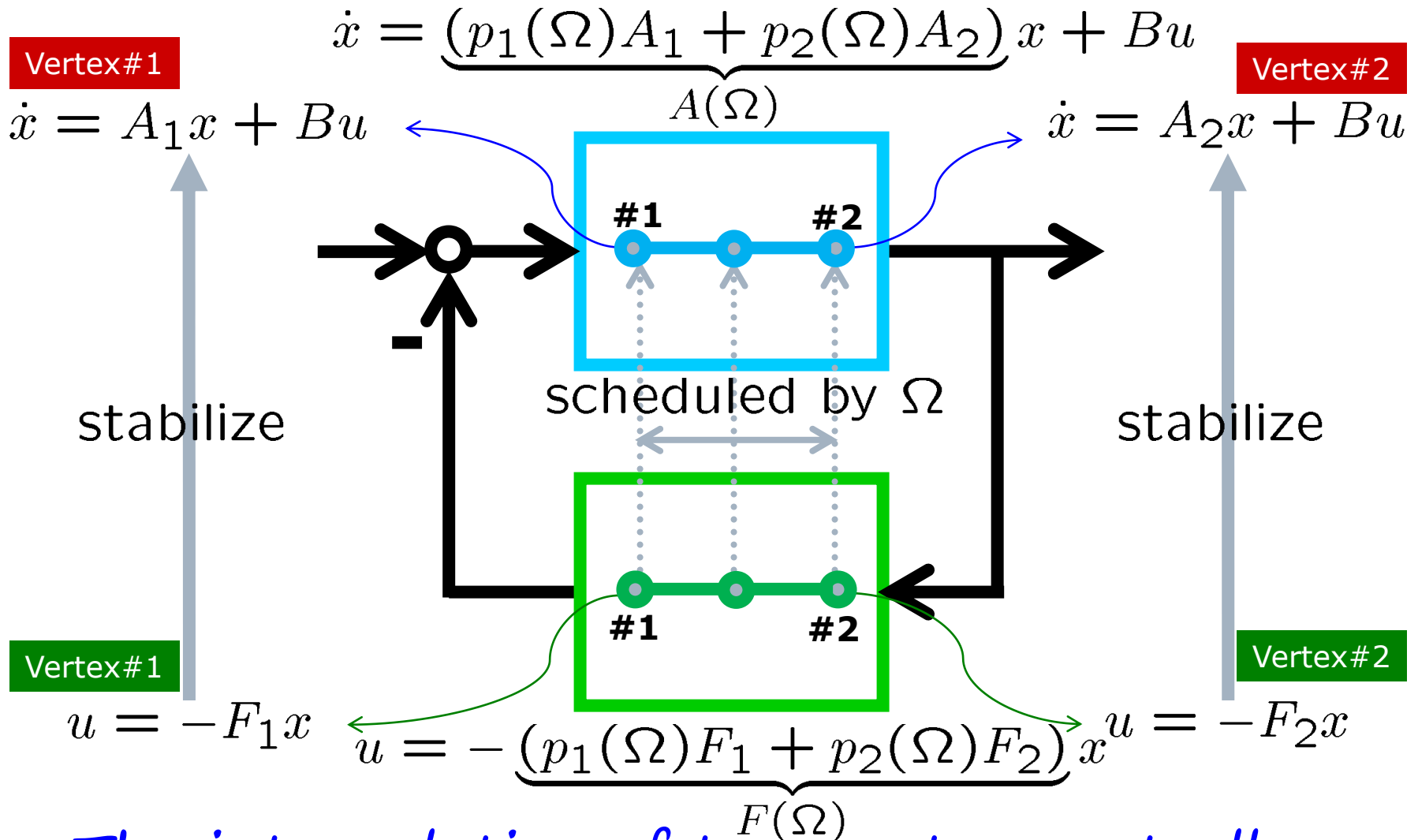
$$\dot{x} = \underbrace{(p_1(\Omega)A_1 + p_2(\Omega)A_2)}_{A(\Omega)} x + Bu$$

where $A_1 = A(\Omega_{min})$, $A_2 = A(\Omega_{max})$ and

$$p_1(\Omega) = \frac{\Omega_{max} - \Omega}{\Omega_{max} - \Omega_{min}}, p_2(\Omega) = \frac{\Omega - \Omega_{min}}{\Omega_{max} - \Omega_{min}}$$

satisfying $p_1(\Omega) + p_2(\Omega) = 1$

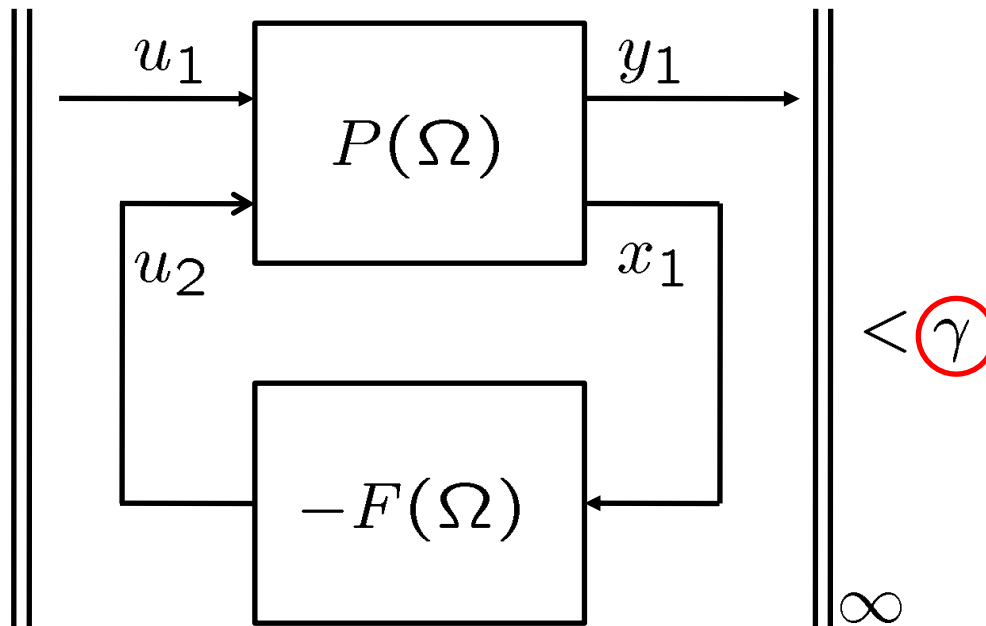
LPV Control



The interpolation of two vertex controllers doesn't guarantee the closed-loop stability.

Design Specification

- Spec.#1:
The closed-loop system is internally stable.
- Spec.#2:
The L_2 -induced gain of the operator is bounded by γ .



CLPS by LPV SF

- 2-port representation

$$P(\Omega) : \begin{cases} \dot{x} = A(\Omega)x + B_1u_1 + B_2u_2 \\ \underbrace{\begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix}}_{y_1} = \underbrace{\begin{bmatrix} C \\ 0 \end{bmatrix}}_{C_1} x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{D_{11}} u_1 + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}}_{D_{12}} u_2 \\ y_2 = x \end{cases}$$

- state feedback

$$u_2 = -F(\Omega)y_2$$

$$\begin{aligned} A(\Omega) &= p_1(\Omega)A_1 + p_2(\Omega)A_2 \\ F(\Omega) &= p_1(\Omega)F_1 + p_2(\Omega)F_2 \end{aligned}$$

- closed-loop system

$$\begin{cases} \dot{x} = (A(\Omega) - B_2F(\Omega))x + B_1u_1 \\ y_1 = \underbrace{\begin{bmatrix} C \\ -F(\Omega) \end{bmatrix}}_{C_1 - D_{12}F(\Omega)} x \end{cases}$$

LMI-Based Design of LPV SF

- Minimize γ on $Y = Y^T, Z_1, Z_2$
subject to $Y > 0$ and
LMI-SF1,2,3,4 for vertex1
LMI-SF1,2,3,4 for vertex2
(LMI: Linear Matrix Inequality)
- Determine the State Feedback gain
for each vertex F_1, F_2 by
$$F_1 = Z_1 Y^{-1}$$
$$F_2 = Z_2 Y^{-1}$$

LMIs for SF

- **LMI-SF1:**

$$AY - B_2Z + (*)^T < -2\alpha Y$$

- **LMI-SF2:**

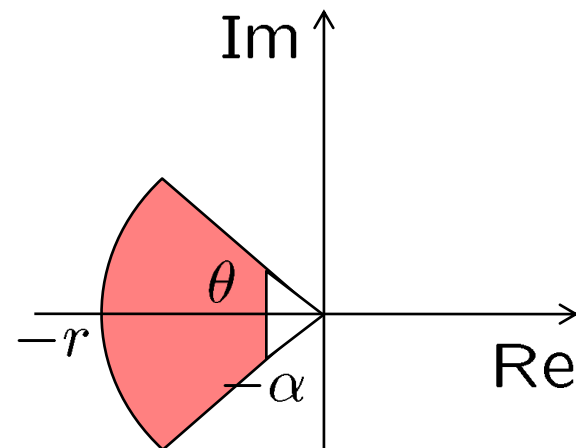
$$\begin{bmatrix} -rY & AY - B_2Z \\ (*)^T & -rY \end{bmatrix} < 0$$

- **LMI-SF3:**

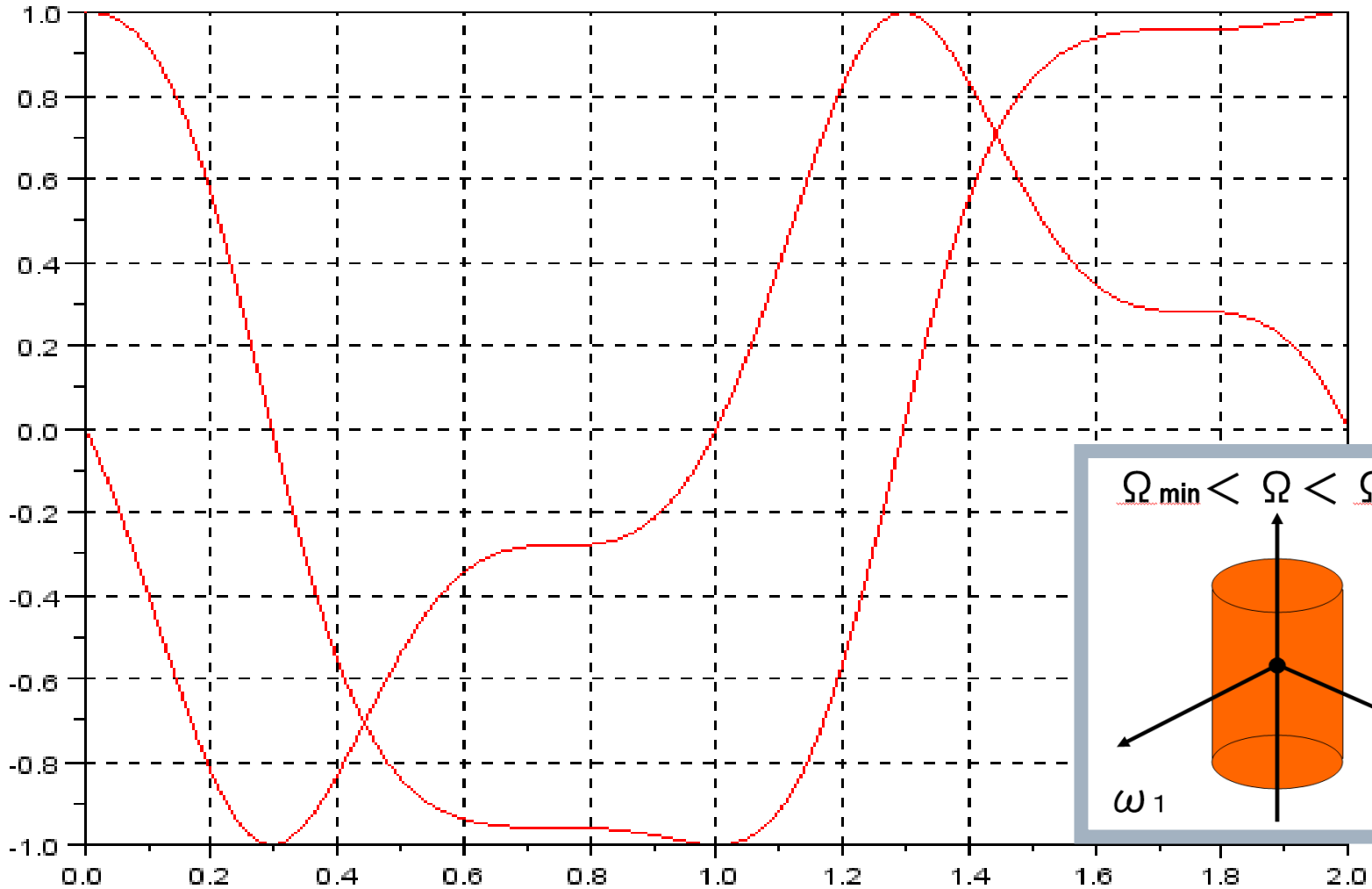
$$\begin{bmatrix} \sin \theta (AY - B_2Z + (*)^T) \\ -\cos \theta (AY - B_2Z - (*)^T) \\ \cos \theta (AY - B_2Z - (*)^T) \\ \sin \theta (AY - B_2Z + (*)^T) \end{bmatrix} < 0$$

- **LMI-SF4:**

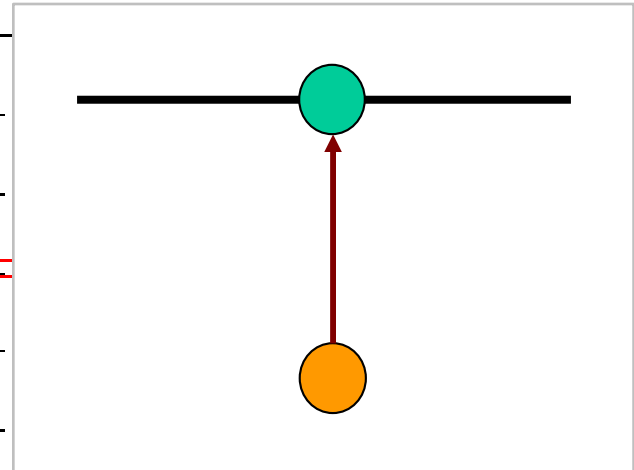
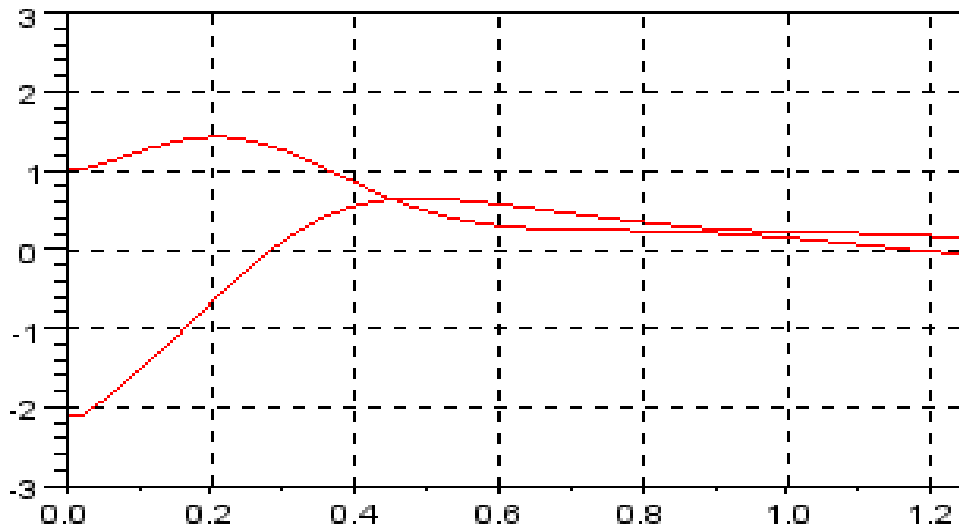
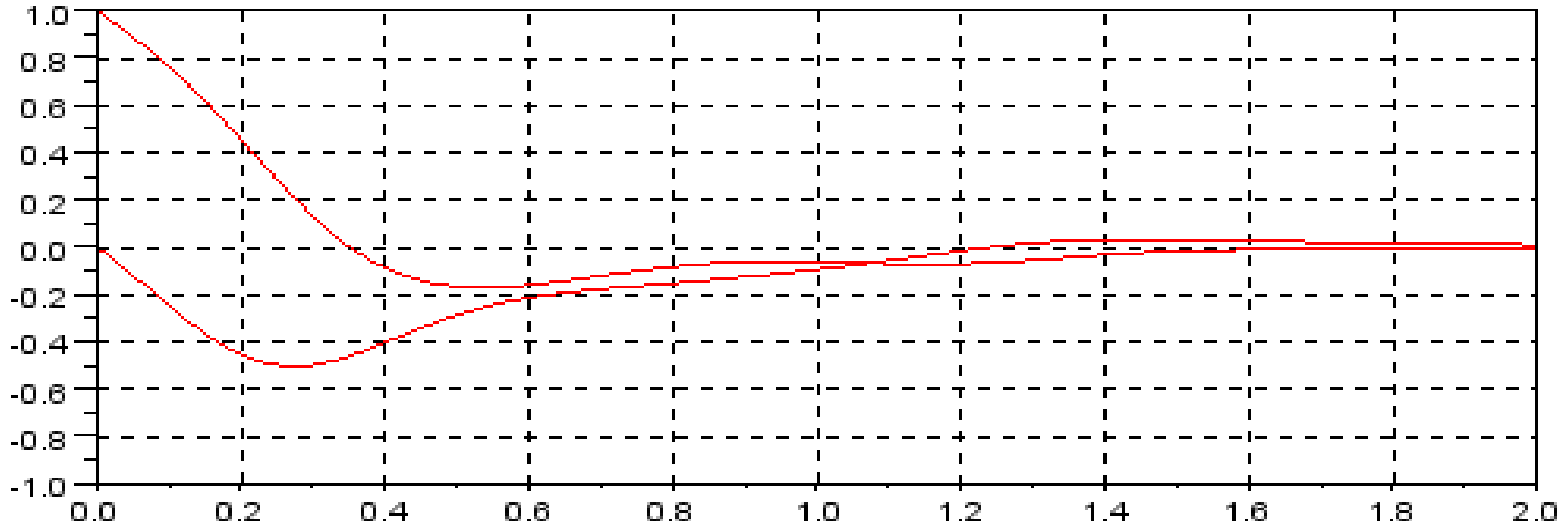
$$\begin{bmatrix} AY - B_2Z + (*)^T & B_1 & (*)^T \\ (*)^T & -\gamma^2 I & (*)^T \\ C_1 Y - D_{12} Z & D_{11} & -I \end{bmatrix} < 0$$



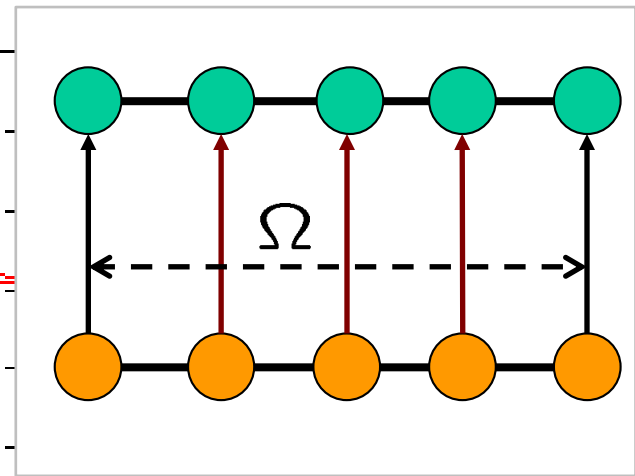
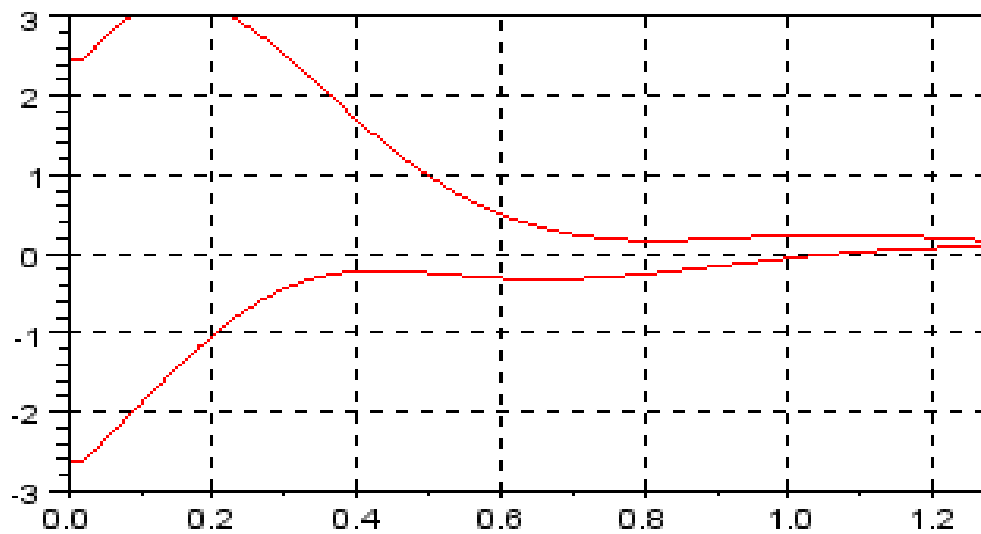
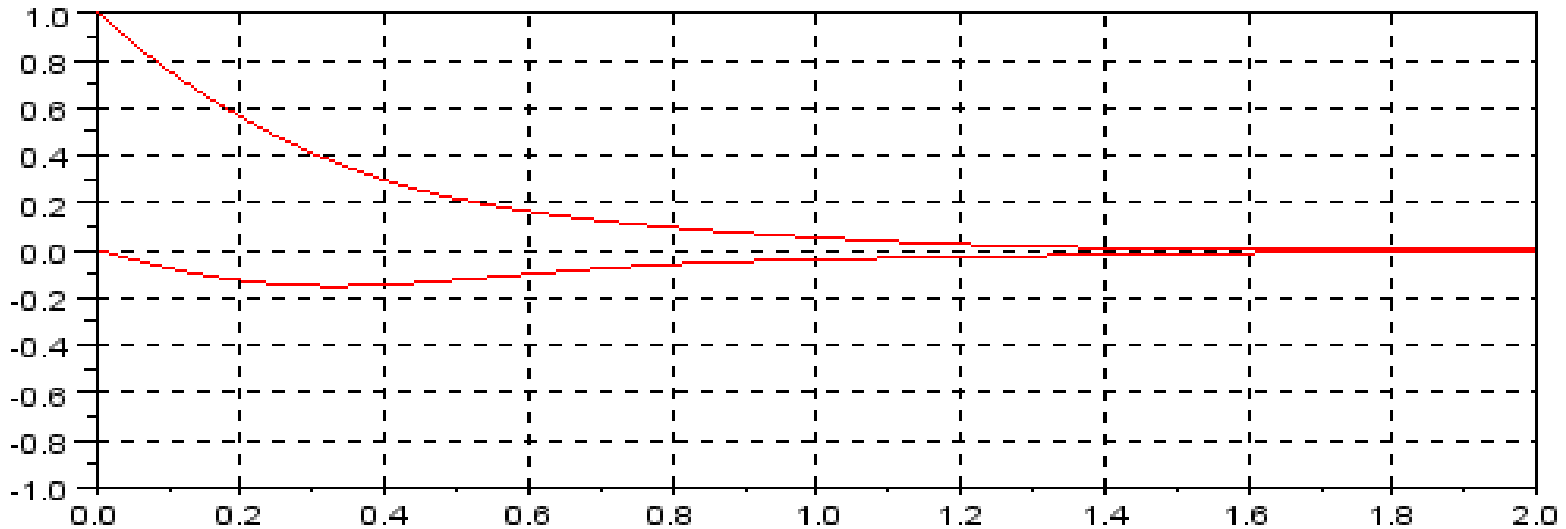
No Control



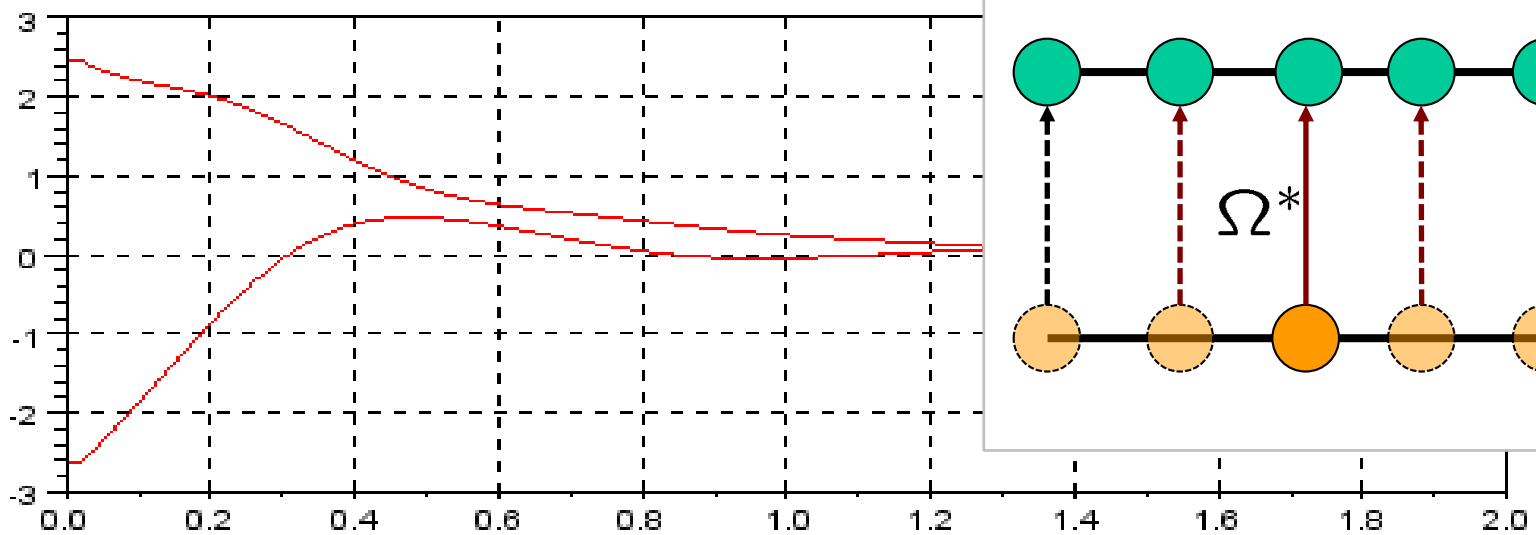
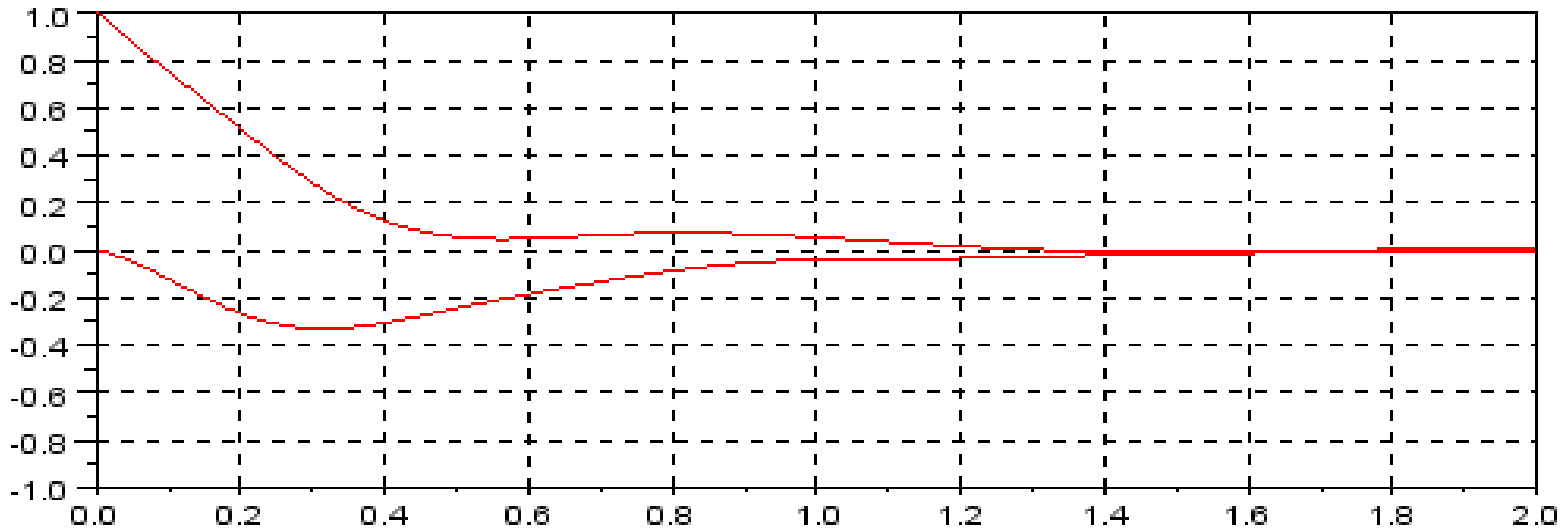
LTI Control (SF)



LPV Control (SF)



Quasi-LPV Control (SF)



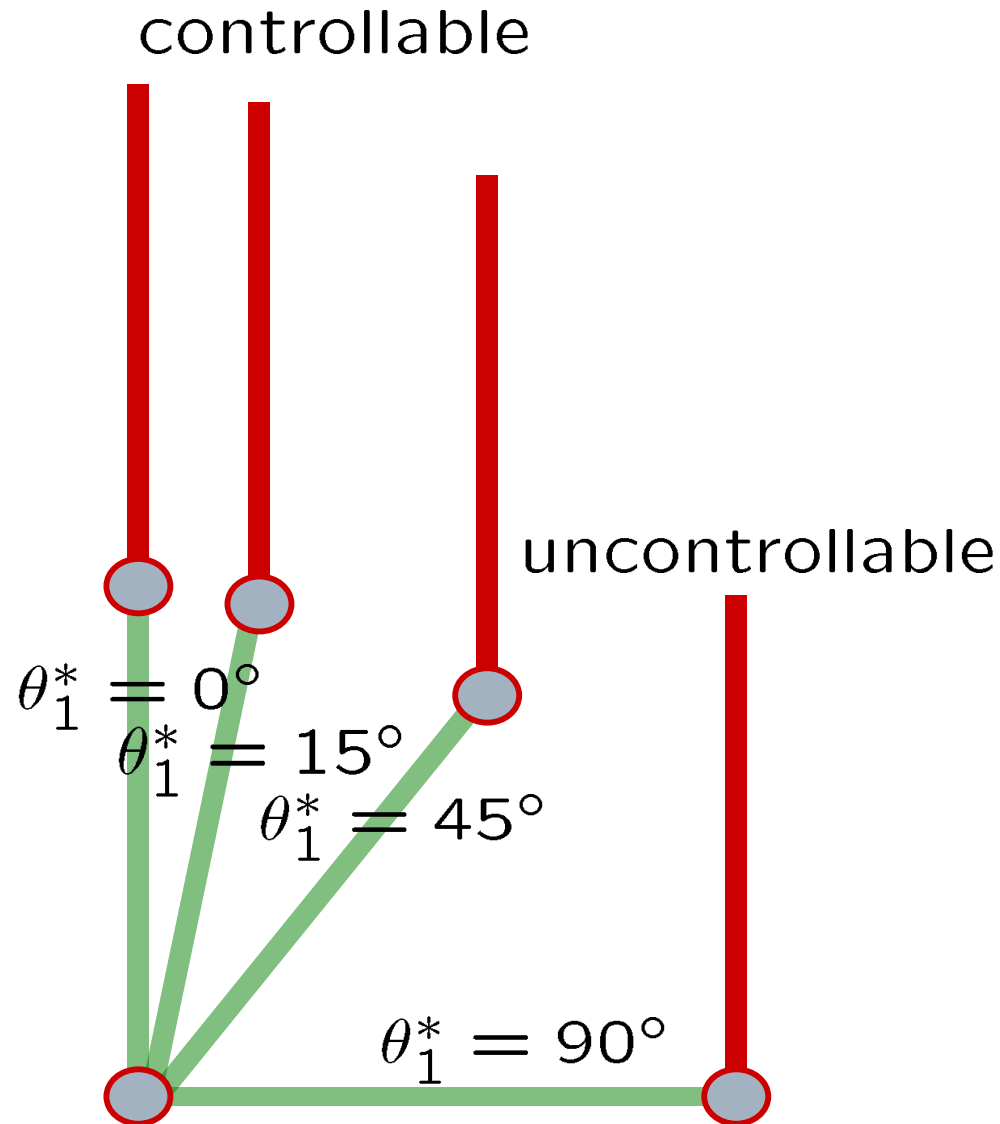
Arm-Driven IP (ADIP, 1997)

[204]

2



Equilibrium States for ADIP



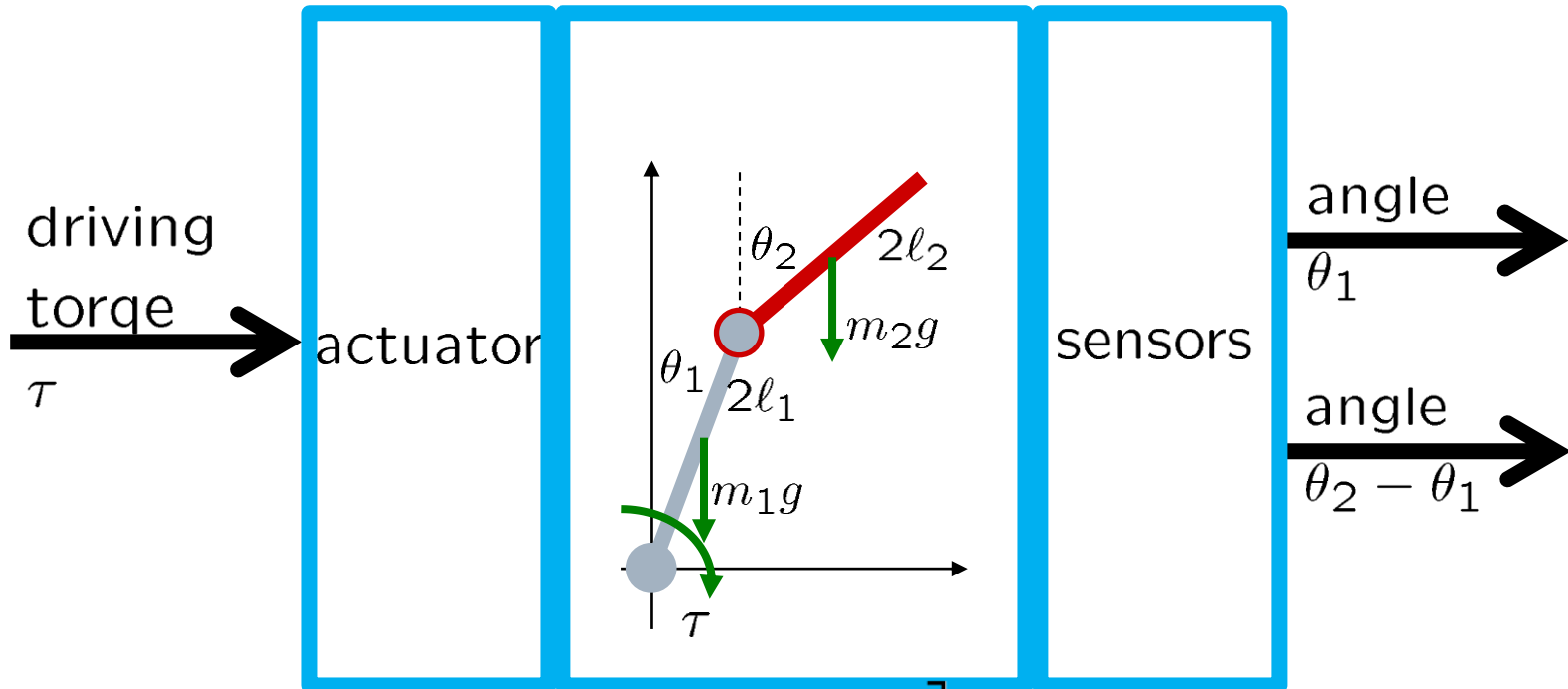
The horizontal movement is reduced.

Wide-range Stabilization of ADIP

manipulated
variable

state variables
 $\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$

measured
variables



$$\begin{bmatrix} \frac{4}{3}m_1l_1^2 + 4m_2l_1^2 & 2m_2l_1l_2 \cos \theta_{21} \\ 2m_2l_1l_2 \cos \theta_{21} & \frac{4}{3}m_2l_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -2m_2l_1l_2\dot{\theta}_2^2 \sin \theta_{21} \\ 2m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(m_1 + 2m_2)l_1g \sin \theta_1 \\ -m_2l_2g \sin \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \tau$$

Under-actuated System

LTI Model for ADIP

- State Equation ($\theta_1^* = 0$)

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \dot{\theta}_1 & \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}^T, \quad u = \tau$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{12 \ell_1 l_1 g m_2 + 6 \ell_1 l_1 g m_1}{-6 \ell_1 l_1^2 m_2 - 8 \ell_1 l_1^2 m_1} & \frac{9 \ell_1 l_1 g m_2}{-6 \ell_1 l_1^2 m_2 - 8 \ell_1 l_1^2 m_1} & 0 & 0 \\ \frac{18 \ell_1 l_1 g m_2 + 9 \ell_1 l_1 g m_1}{-6 \ell_1 l_1 \ell_1 l_2 m_2 - 8 \ell_1 l_1 \ell_1 l_2 m_1} & \frac{-18 \ell_1 l_1 g m_2 - 6 \ell_1 l_1 g m_1}{-6 \ell_1 l_1 \ell_1 l_2 m_2 - 8 \ell_1 l_1 \ell_1 l_2 m_1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{6}{-6 \ell_1 l_1^2 m_2 - 8 \ell_1 l_1^2 m_1} \\ \frac{9}{-6 \ell_1 l_1 \ell_1 l_2 m_2 - 8 \ell_1 l_1 \ell_1 l_2 m_1} \end{bmatrix}$$

- Output Equation

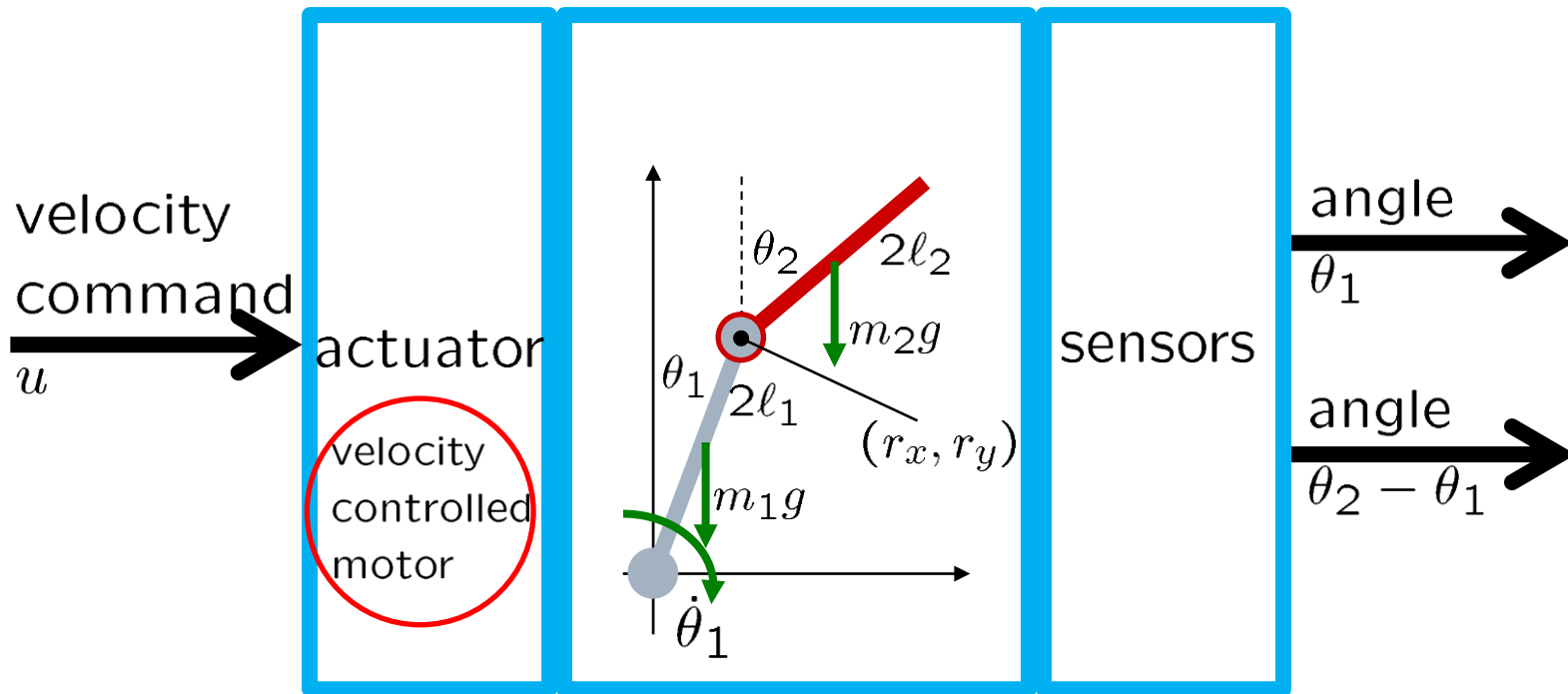
$$y = Cx, \quad y = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 - \theta_1 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Velocity Controlled Actuator

manipulated
variable

state variables
 z, \dot{z}, r_x

measured
variables



$$\frac{d}{dt}\dot{\theta}_1 = -\frac{1}{T_a}\dot{\theta}_1 + \frac{K_a}{T_a}u \quad \left(\begin{array}{l} r_x = 2l_1 \sin \theta_1, \quad \dot{r}_x = r_y \dot{\theta}_1, \quad \ddot{r}_x = \dot{r}_y \dot{\theta}_1 + r_y \ddot{\theta}_1 \\ r_y = 2l_1 \cos \theta_1, \quad \dot{r}_y = -r_x \dot{\theta}_1, \quad \ddot{r}_y = -\dot{r}_x \dot{\theta}_1 - r_x \ddot{\theta}_1 \end{array} \right)$$

$$\underbrace{\cos \theta_2}_1 \ddot{r}_x + \frac{4}{3}l_2 \ddot{\theta}_2 = (g + \underbrace{\ddot{r}_y}_0) \underbrace{\sin \theta_2}_{\theta_2}$$

$$\Rightarrow z = r_x + \frac{4l_2}{3}\theta$$

$$\ddot{z} = \frac{3g}{4l_2}(z - r_x)$$

LPV Model for ADIP

- Motion equation

$$\ddot{z} = \frac{3g}{4l_2}(z - r_x), \dot{r}_x = r_y \dot{\theta}_1, \frac{d}{dt} \dot{\theta}_1 = -\frac{1}{T_a} \dot{\theta}_1 + \frac{K_a}{T_a} u$$

- State equation

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ r_x \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}}_{\dot{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{3g}{4l_2} & 0 & -\frac{3g}{4l_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_y \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_a} \end{bmatrix}}_{A(r_y)} \underbrace{\begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ r_x \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_a}{T_a} \end{bmatrix}}_B \underbrace{\dot{\theta}_1}$$

$$(\underline{r}_y \leq r_y \leq \overline{r}_y, r_y = 2l_1 \cos \theta_1)$$

- Polytopic LPV Model:

$$\dot{x} = \underbrace{(p_1(r_y)A_1 + p_2(r_y)A_2)}_{A(r_y)} x + Bu$$

where $A_1 = A(\underline{r}_y)$, $A_2 = A(\overline{r}_y)$ and

$$p_1(r_y) = \frac{\overline{r}_y - r_y}{\overline{r}_y - \underline{r}_y}, p_2(r_y) = \frac{r_y - \underline{r}_y}{\overline{r}_y - \underline{r}_y}$$

satisfying $p_1(r_y) + p_2(r_y) = 1$

varying parameter velocity input

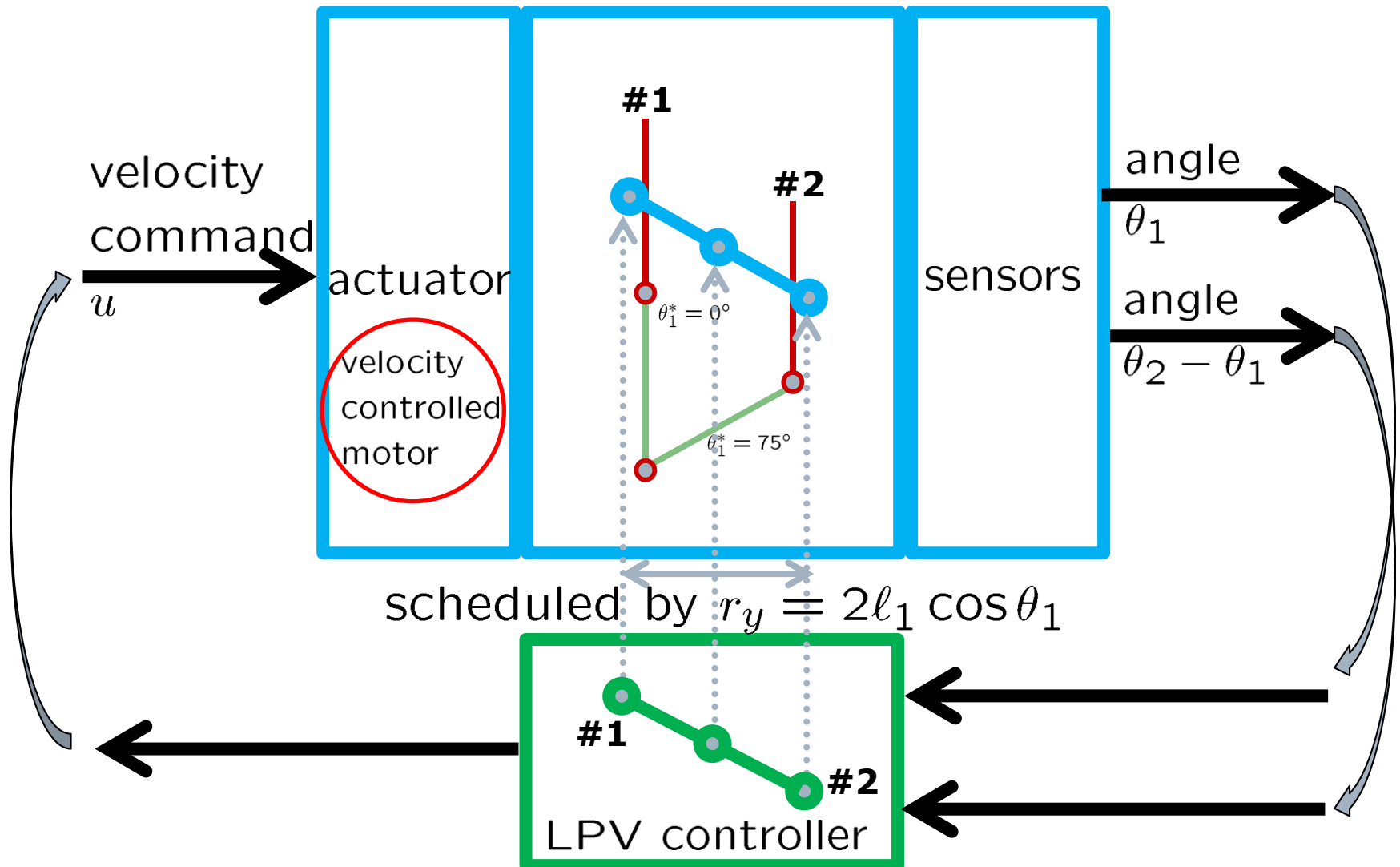
Control System for ADIP

manipulated
variable

state variables

$$z, \dot{z}, r_x$$

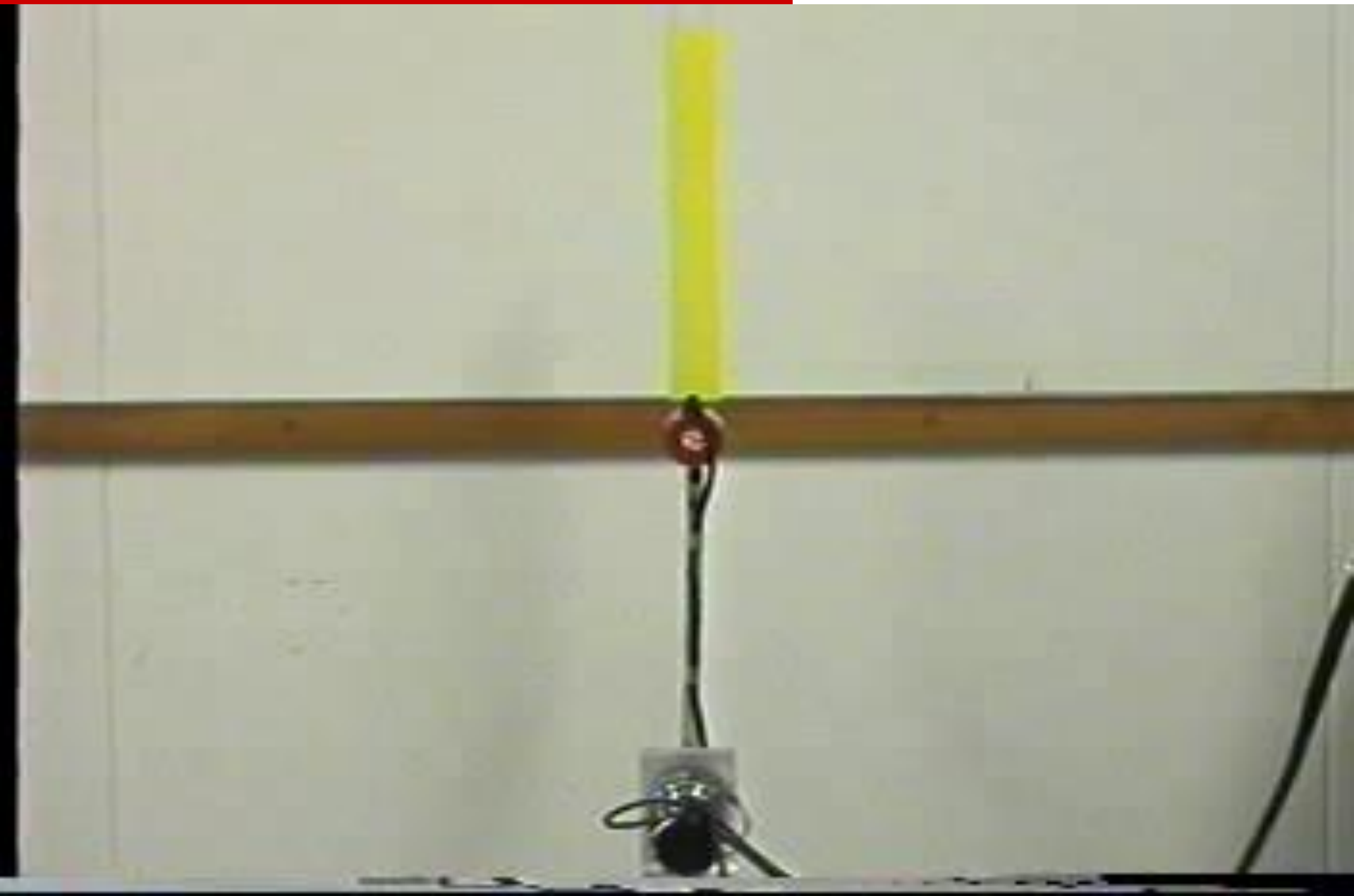
measured
variables



Arm-Driven IP (1997)

[211]

2



Outline

1 **LQI Control**

Linear-Quadratic-Integral Design of Linear-Time-Invariant Control

2 **LPV Control**

Linear-Matrix-Inequality Based Design of Linear-Parameter-Varying Control

Applications

3 **Underwater Vehicle**

4 Flexible Riser

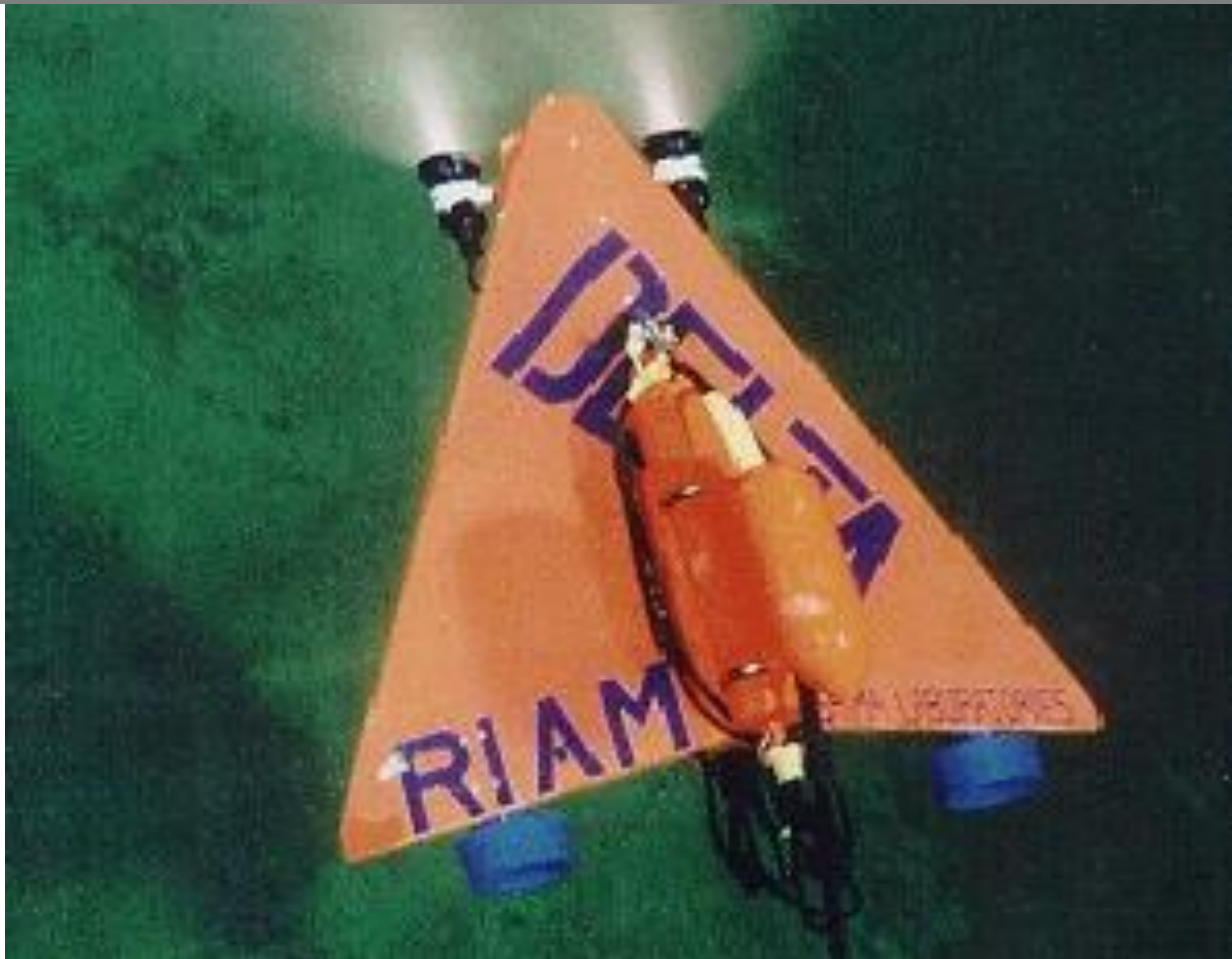
5 Azimuth thrusters

6 Nomoto's Model

7 Wind Turbine

Underwater Vehicle: DELTA

**Wide-area survey:
Towing mode for wide scanning
Self-propulsive mode for local investigation**



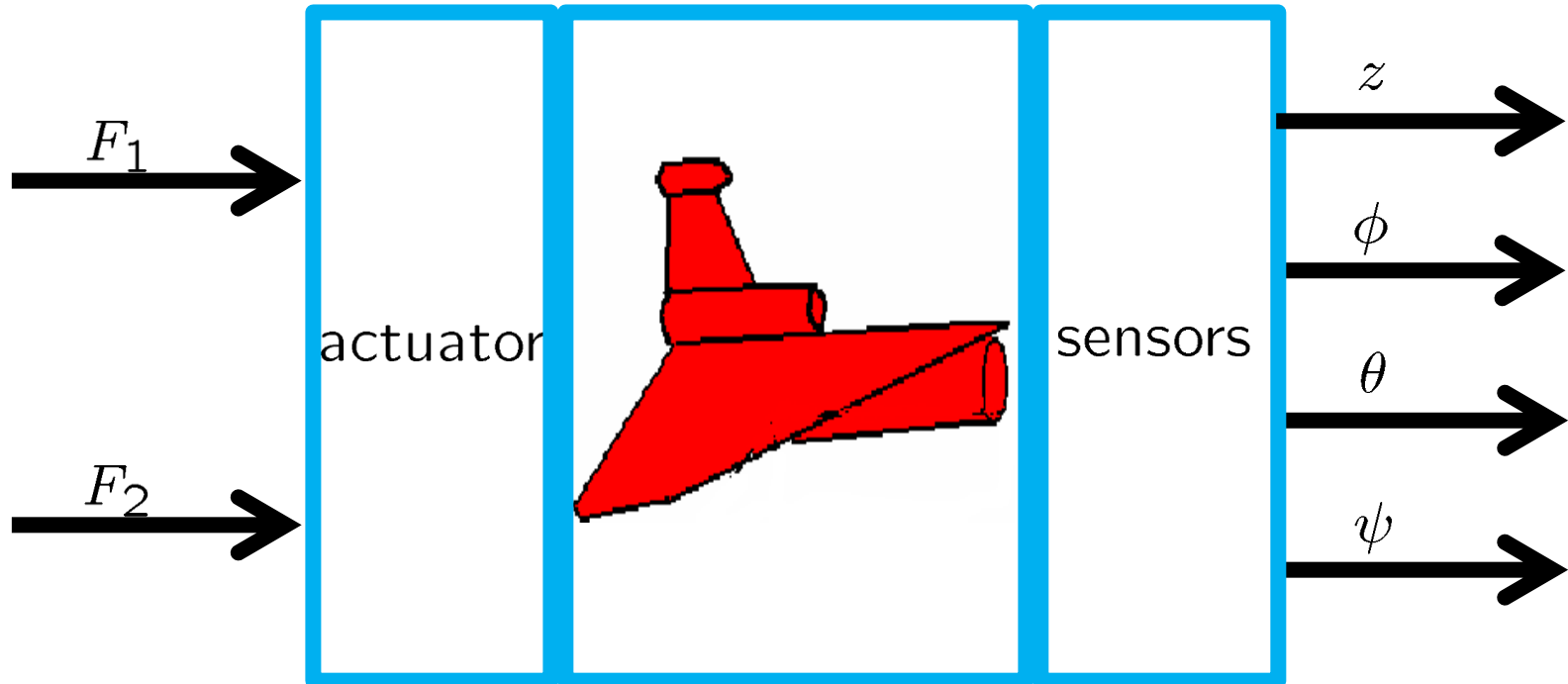
Underwater Vehicle (DELTA)

manipulated
variables

state variables

$x, y, z, \phi, \theta, \psi, u, v, w, p, q, r$

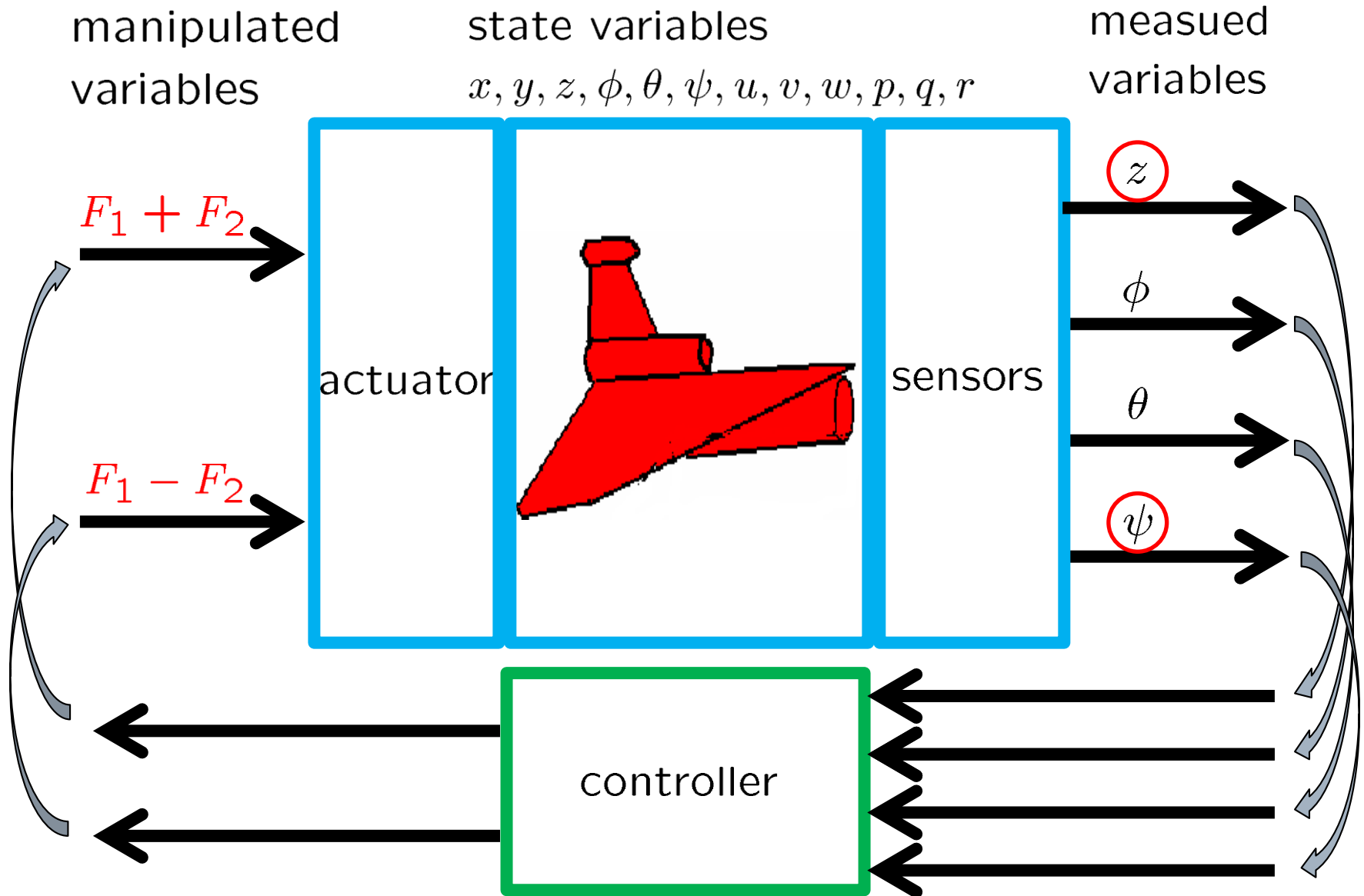
measured
variables



$$\dot{\xi}_E = J(\xi_E)\xi_B \quad (\xi_E = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T, \xi_B = [u, v, w, p, q, r]^T)$$

$$M\dot{\xi}_B + (C(\xi_B) + D(\xi_B))\xi_B + G(\xi_E) = F$$

Control System for DELTA



Exp# 1 (LQI Control, 1992)

[216]

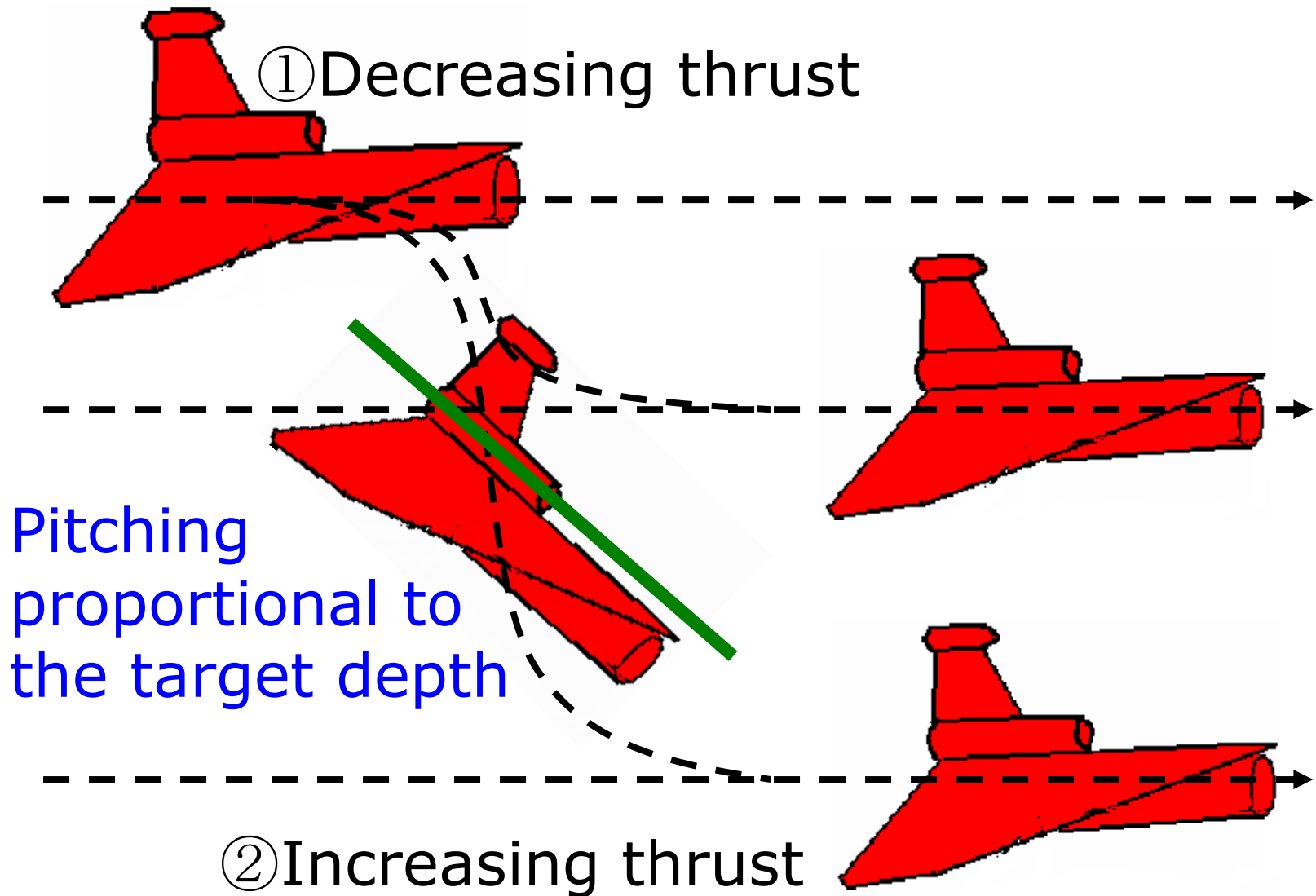
3

Exp#2 (Manual and LQI Controls) ^[217]

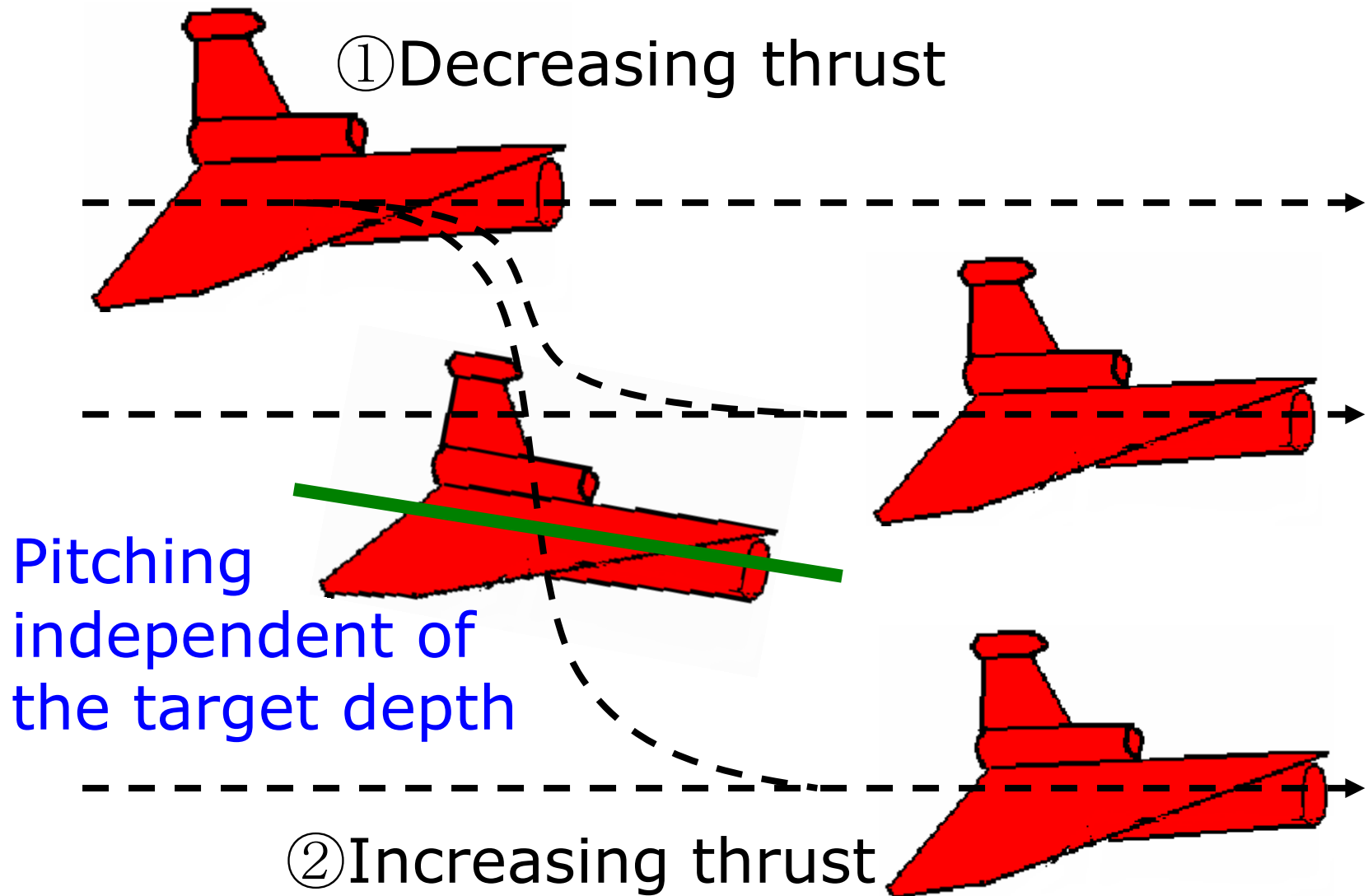
3



Diving by **Linear** Control



Diving by **Scheduling** Control



Physical Parameters of DELTA

$$L=113, d=0.185, \rho=102, g=9.8$$

$$\nabla=53.24/1000, x_T=L \times (-0.088495), z_T=L \times (-0.04956)$$

$$x_B=-0.10555+0.0015, z_B=-0.04254$$

$$m=(51.82+w_1+w_2)/9.8, dm=0.5 \rho L^2 d \times 0.02434$$

$$x_{G^{**}}=(-5.1359+0.4787w_1-0.4368w_2)/(48.9469+w_1+w_2)$$

$$x_G=(m-dm)/m x_{G^{**}}+dm/m x_{dm}, z_G=(-1.5536+0.075w_1+0.075w_2)/(51.82+w_1+w_2)$$

$$I_{xx}=0.32323+0.075^2(w_1+w_2)/9.8$$

$$I_{yy^*}=0.54778+((0.4787^2+0.075^2)w_1+(0.4368^2+0.075^2)w_2)/9.8, I_{yy}=I_{yy^*}+dm x_{dm}^2$$

$$I_{zz^*}=0.86779+(0.4787^2 w_1 + 0.4368^2 w_2)/9.8, I_{zz}=I_{zz^*}+dm x_{dm}^2, I_{xz}=0$$

Hydrodynamic
Coefficients

$$A_{11}=0.5 \rho L^2 d \times 0.1278, A_{22}=0.5 \rho L^2 d \times 0.0, A_{33}=0.5 \rho L^2 d \times 0.5981$$

$$A_{44}=0.5 \rho L^4 d \times 0.0843, A_{55}=0.5 \rho L^4 d \times 0.4499, A_{66}=0.5 \rho L^4 d \times 0.0$$

$$X_{uu}=0.5 \rho L d \times (-0.4062), X_{uuk}=0.5 \rho L d \times (-0.173 \times 1.0), X_v=0.5 \rho U L d \times 0.4944, X_{ww}=0.5 \rho L d \times 0.2017$$

$$Y_v=0.5 \rho U L d \times (-9.901), Y_{vv}=0.5 \rho L d \times 7.88, Y_p=0.5 \rho U L^2 d \times 0.24618, Y_r=0.5 \rho U L^2 d \times 4.7369, Y_{rr}=0.5 \rho L^3 d \times 17.695$$

$$Z_w=0.5 \rho U L d \times (-7.726) \times 0.9, Z_q=0.5 \rho U L^2 d \times Z_{q^*}$$

$$K_v=0.5 \rho U L^2 d \times (-0.3254), K_p=0.5 \rho U L^3 d \times (-0.3336), K_r=0.5 \rho U L^3 d \times 0.0029953$$

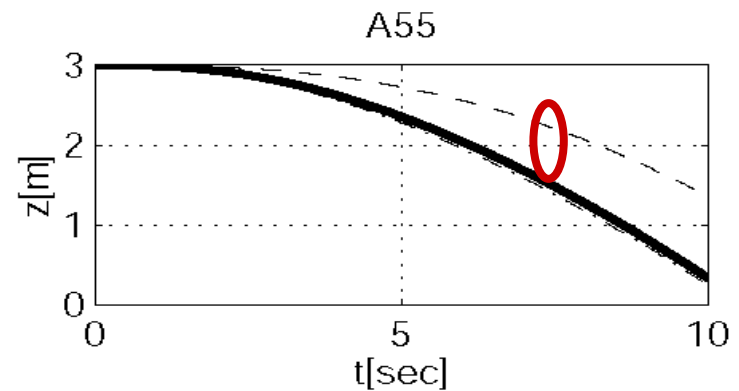
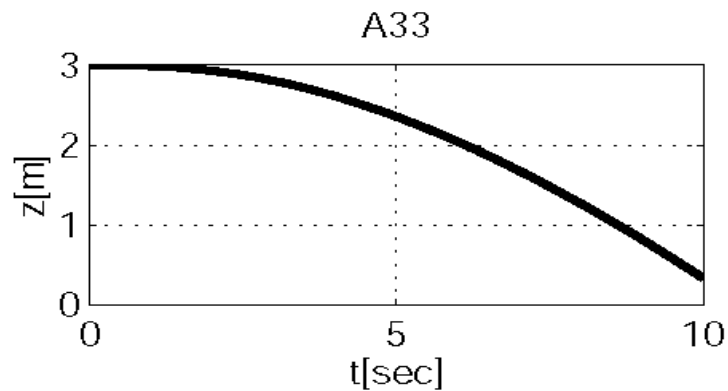
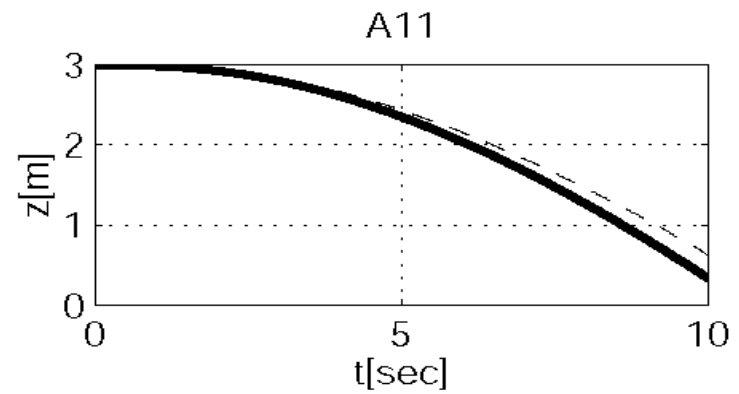
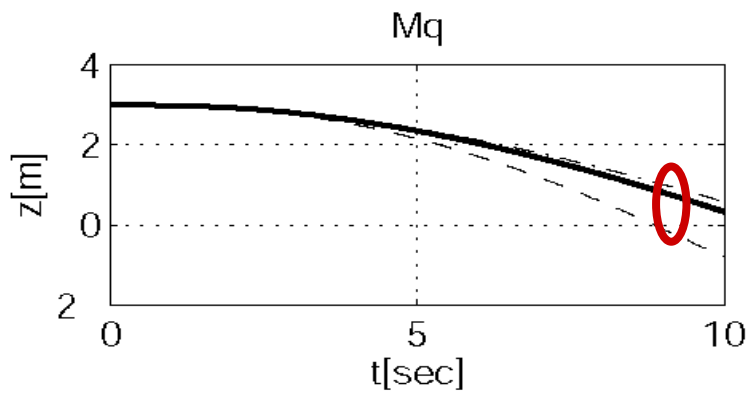
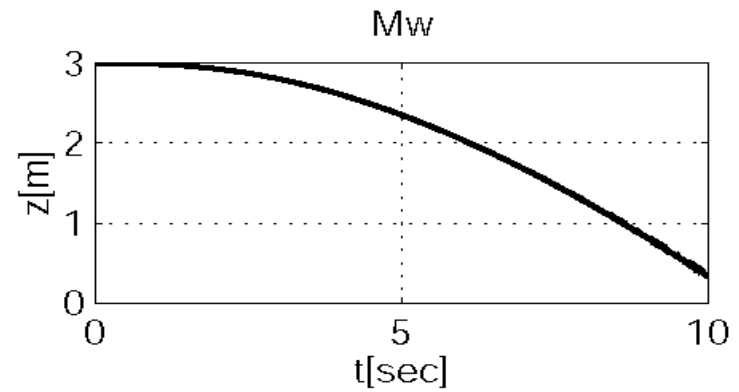
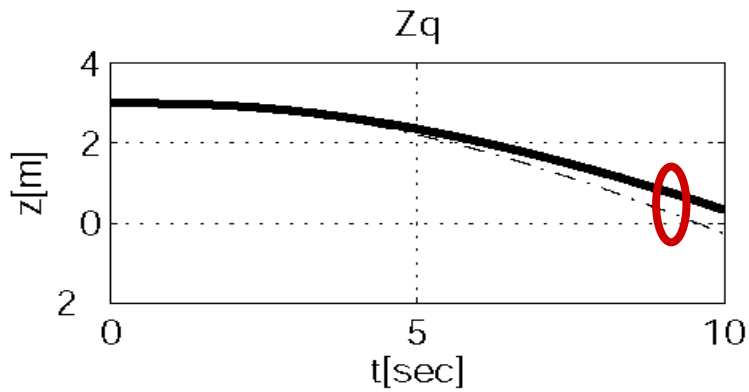
$$M_w=0.5 \rho U L^2 d \times (-0.8822), M_q=0.5 \rho U L^3 d \times M_{q^*}$$

$$N_v=0.5 \rho U L^2 d \times 0.9939, N_{vv}=0.5 \rho L^2 d \times (-6.9564), N_r=0.5 \rho U L^3 d \times (-0.7028), N_{rww}=0$$

$$\ell_{pTHy}=0.306, \ell_z=L \times (-0.1211), \ell_k=L \times (-0.1593), z_{TH}=L \times 0.08496, \ell_{pTHx}=L \times (-0.1209), y_{TH}=0.306$$

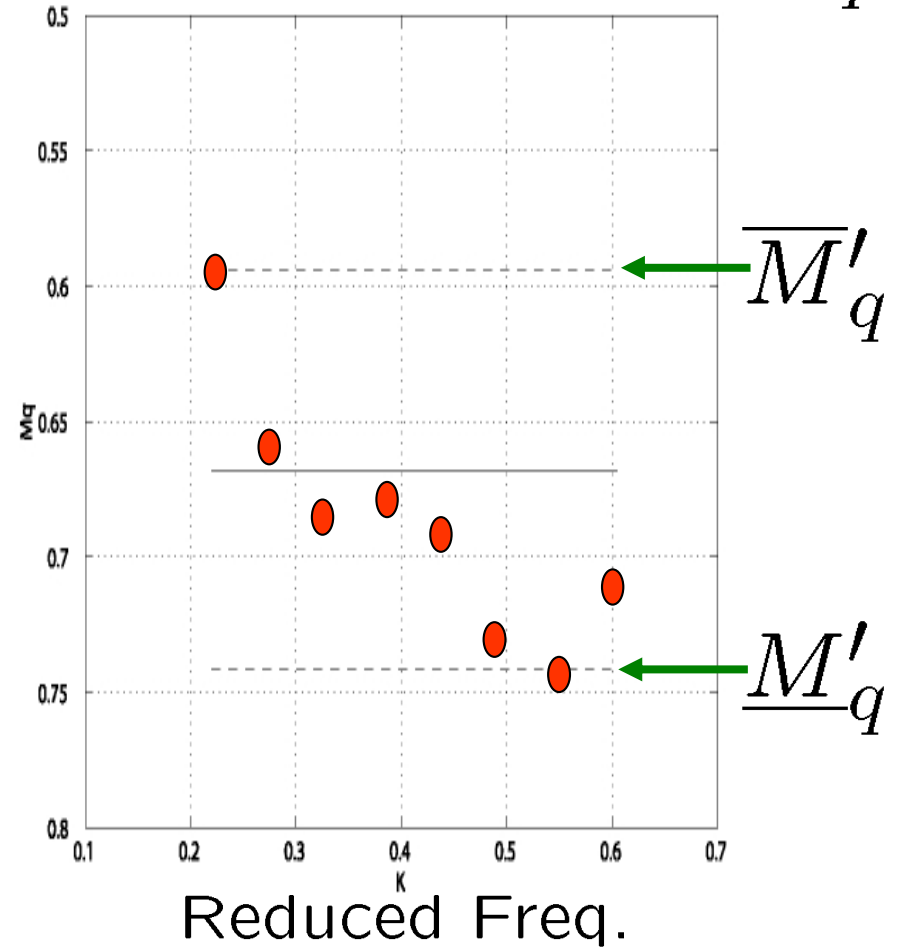
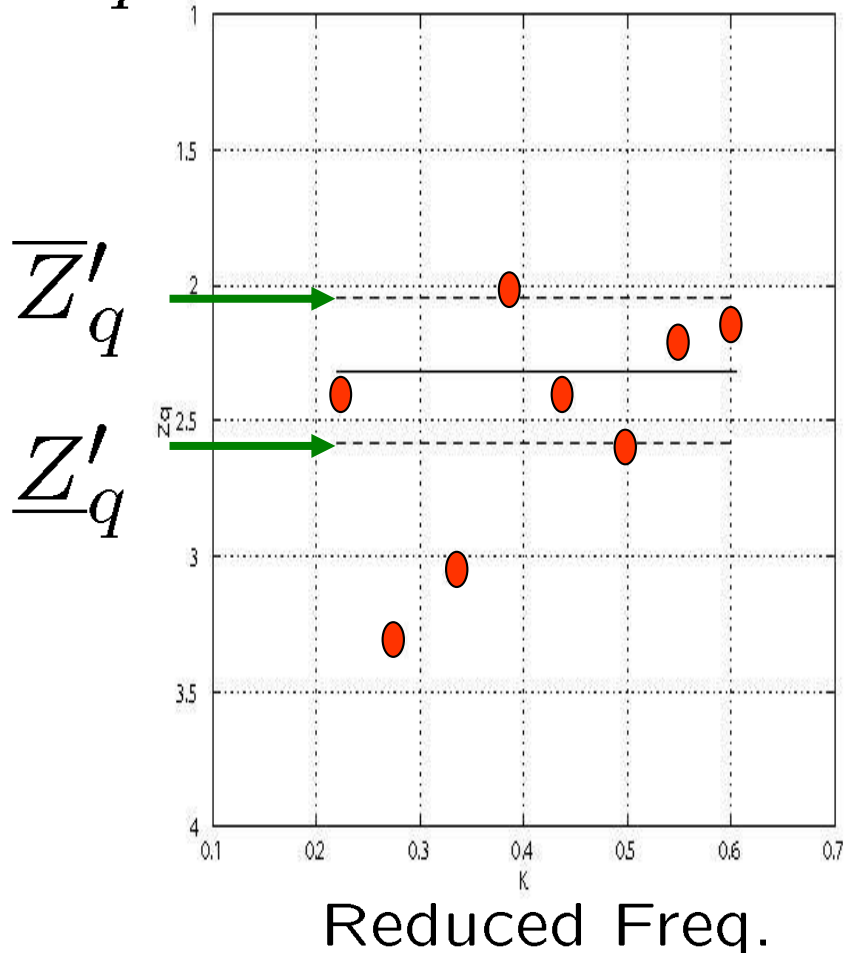
$$b_i=-0.4352, c_i=0.9383, e_i=0.8662, f_i=-0.1054;$$

Parameter Sensitivities



Parameter Uncertainties

$$Z'_q \quad Z_q = \left(\frac{1}{2}\rho U^* L^2\right) Z'_q, \quad M_q = \left(\frac{1}{2}\rho U^* L^3\right) M'_q \quad M'_q$$



LPV Model of DELTA

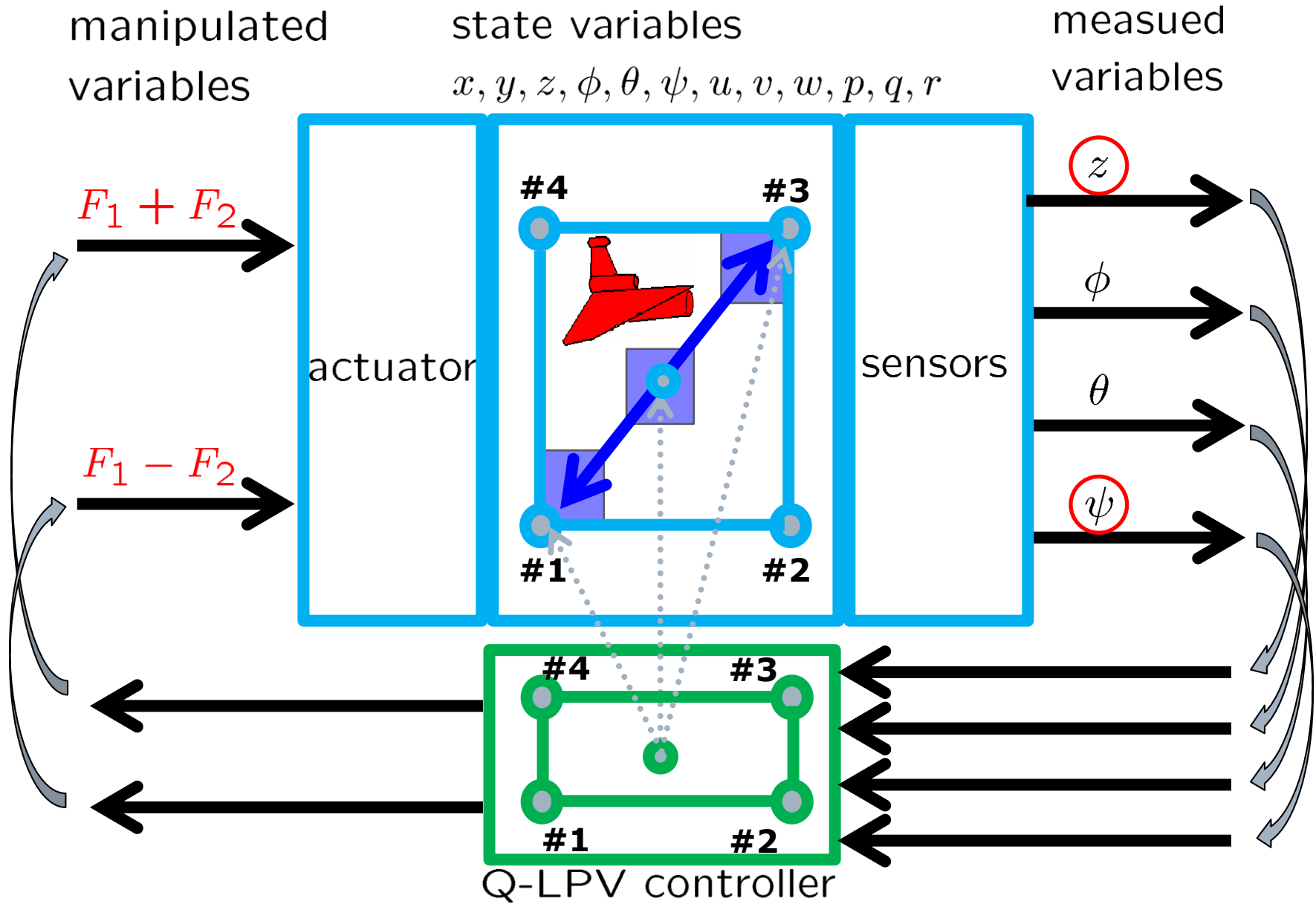
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \xi_E - \xi_E^* \\ \xi_B - \xi_B^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & J(\xi_E) \\ M^{-1}\bar{G} & M^{-1}(\bar{C} + \bar{D}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_E - \xi_E^* \\ \xi_B - \xi_B^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\bar{F} \end{bmatrix} (\zeta - \zeta^*)$$

where

$$A(Z_q, M_q) = \begin{bmatrix} E & J(\xi_E) \\ M^{-1}\bar{G} & M^{-1}(\bar{C} + \bar{D}_0) \end{bmatrix} + U^* \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & M^{-1}\bar{D}_1 \end{bmatrix}$$

$$(\underline{Z}_q \leq Z_q \leq \bar{Z}_q, \underline{M}_q \leq M_q \leq \bar{M}_q)$$

Control System for DELTA



Exp#3 (LTI Control, 1m to 3m)

[225]

3



Exp#4 (Q-LPV Control, 1m to 3m)^[226]

3



Exp#5 (LTI Control, 1m to 4m)

[227]

3



Exp#6 (Q-LPV Control, 1m to 4m)^[228]

3



Exp#7 (LTI Control, 5m to 1m)

[229]

3



Exp#8 (Q-LPV Control, 5m to 1m)^[230]

3



Exp#9 (Q-LPV Control)

[231]

3



Outline

1 LQI Control

Linear-Quadratic-Integral Design of Linear-Time-Invariant Control

2 LPV Control

Linear-Matrix-Inequality Based Design of Linear-Parameter-Varying Control

Applications

3 Underwater Vehicle

4 Flexible Riser

5 Azimuth thrusters

6 Nomoto's Model

7 Wind Turbine

CHIKYU: Deep-sea Drilling Vessel



Length : 210m

Breadth : 38m

Gross tonnage : 57,087tons

Open the new frontier of earth and life science for future of mankind by revealing the system of major earthquakes, global changes, origin of life

CHIKYU: Riser Pipe Units & BOP



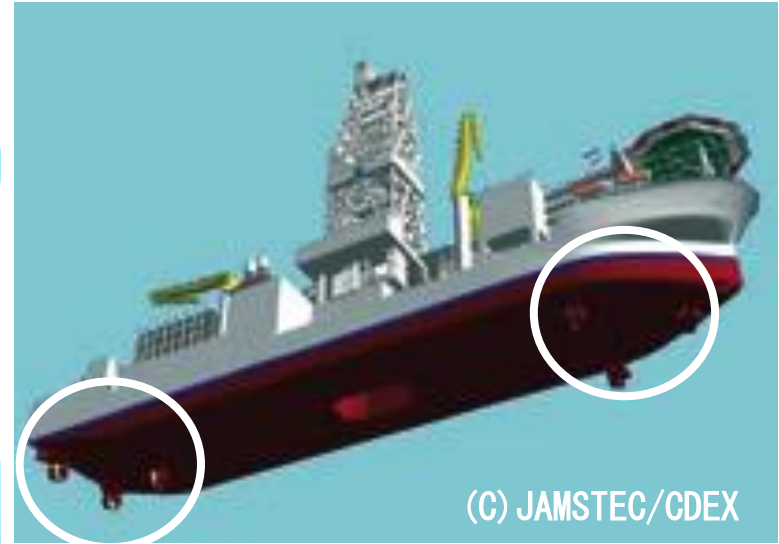
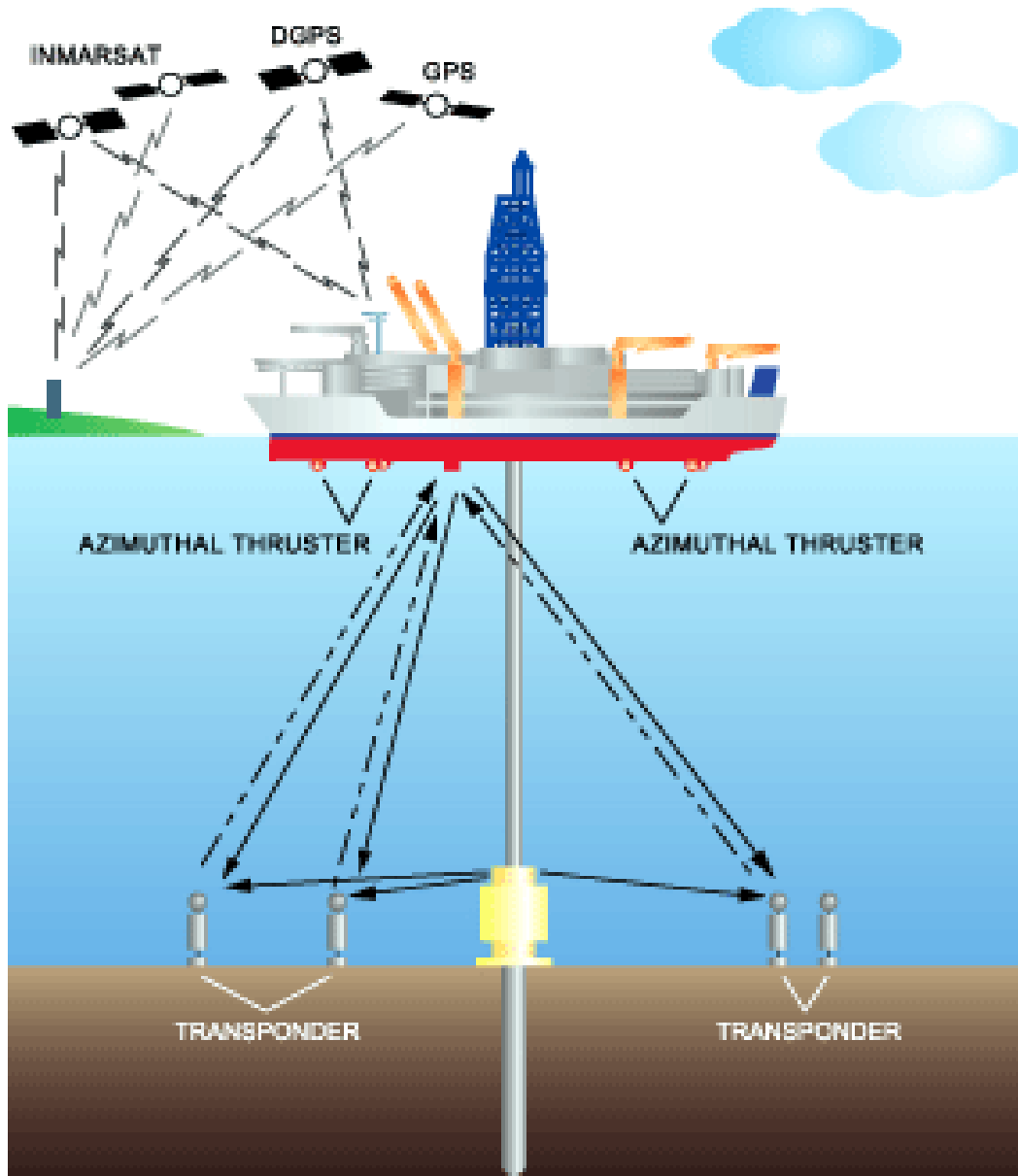
Length : 27m
Diameter : 1.2m

(C) JAMSTEC/CDEX



JAMSTEC/CDEX

CHIKYU: DPS & Azimuth Thrusters



(C) JAMSTEC/CDEX



(C) JAMSTEC/CDEX

CHIKYU: Drill House



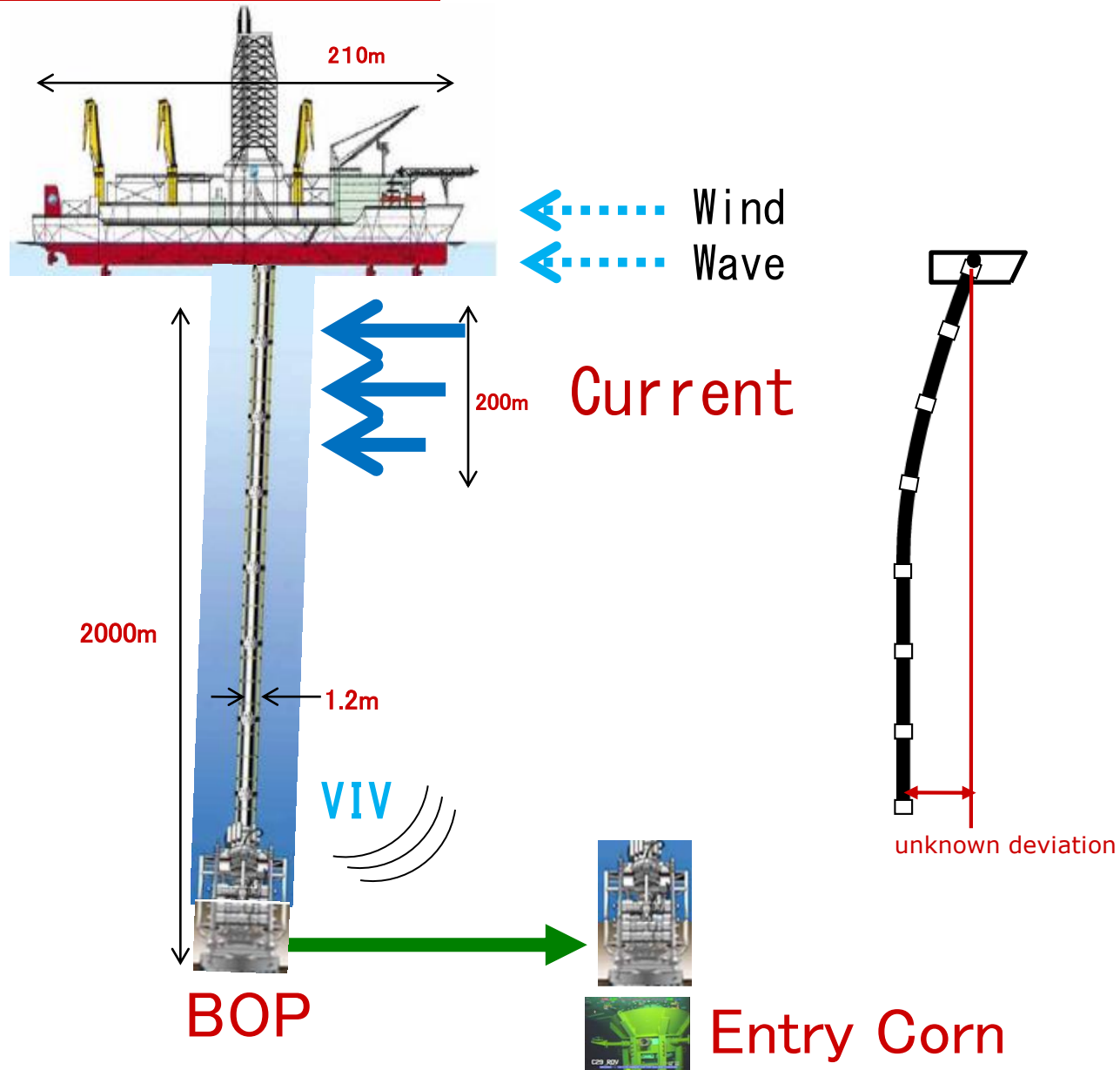
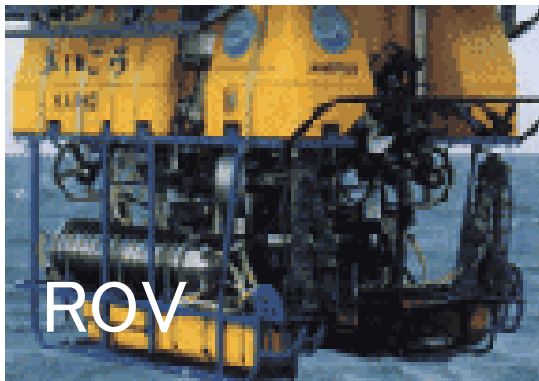
ドリルフロアにある金網で保護されたドリラースハウス。いくつもの制御装置を動かすコントロールルームです。降下中のドリルビットを海中の無人探査機(ROV)でモニタリングしています。

The drill house, a room within a protective steel cage on the drill floor, is where many drilling operations are controlled. Here the controllers are monitoring the drill bit during its descent to the sea floor, using the Remotely Operated Vehicle (ROV).

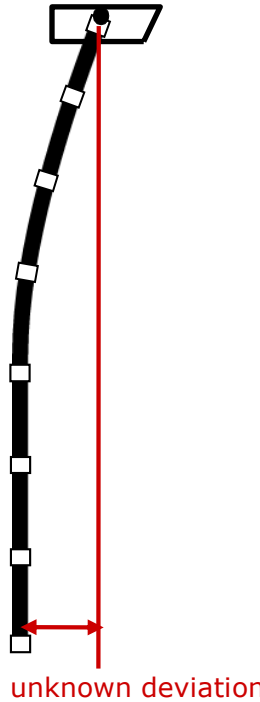
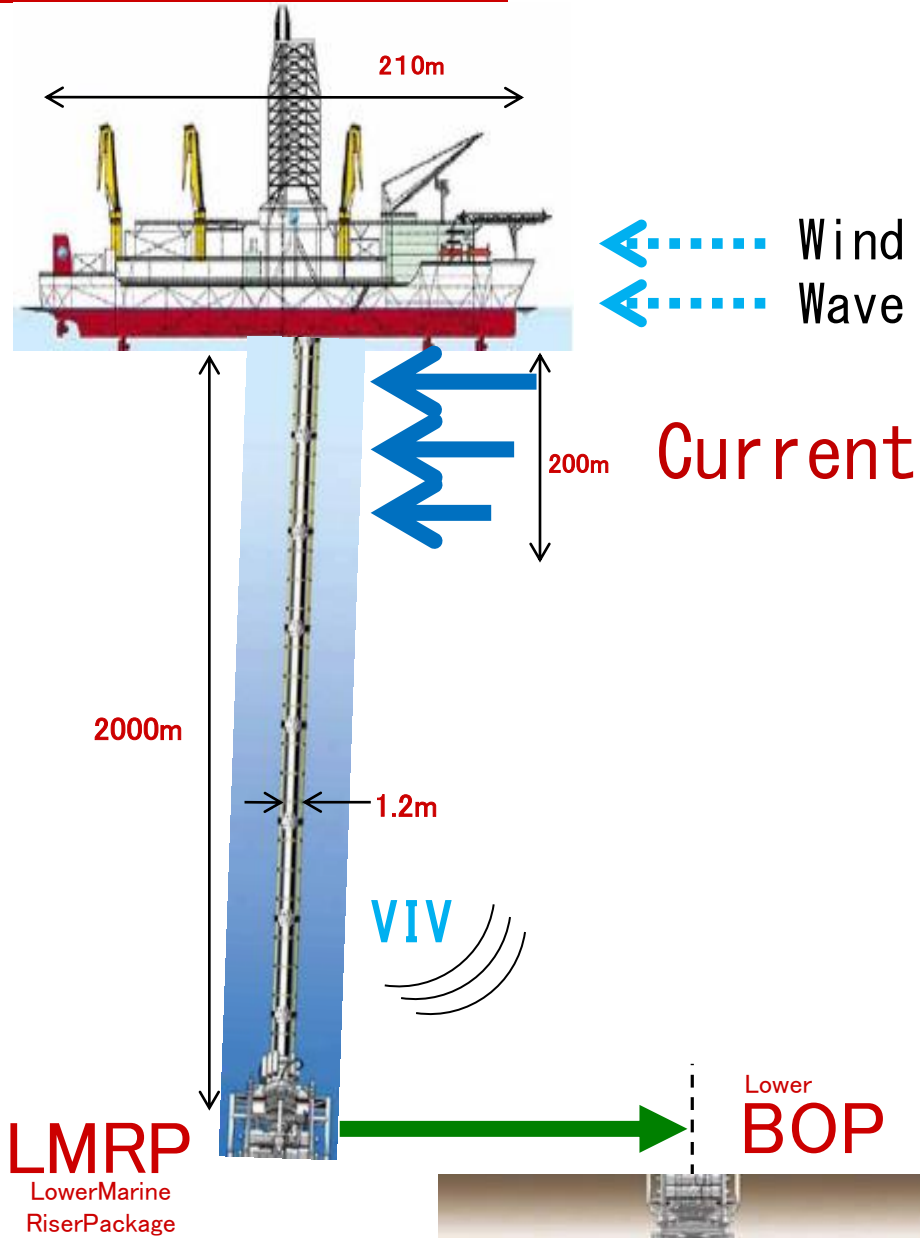
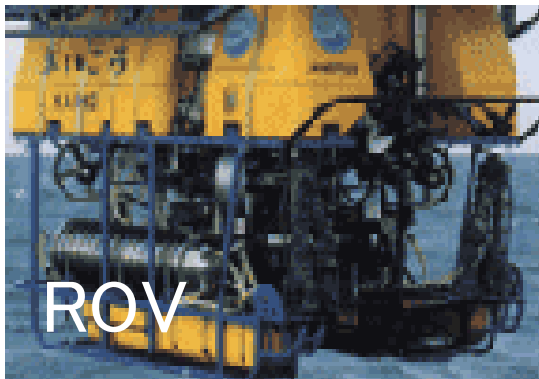
CHIKYU: Operations



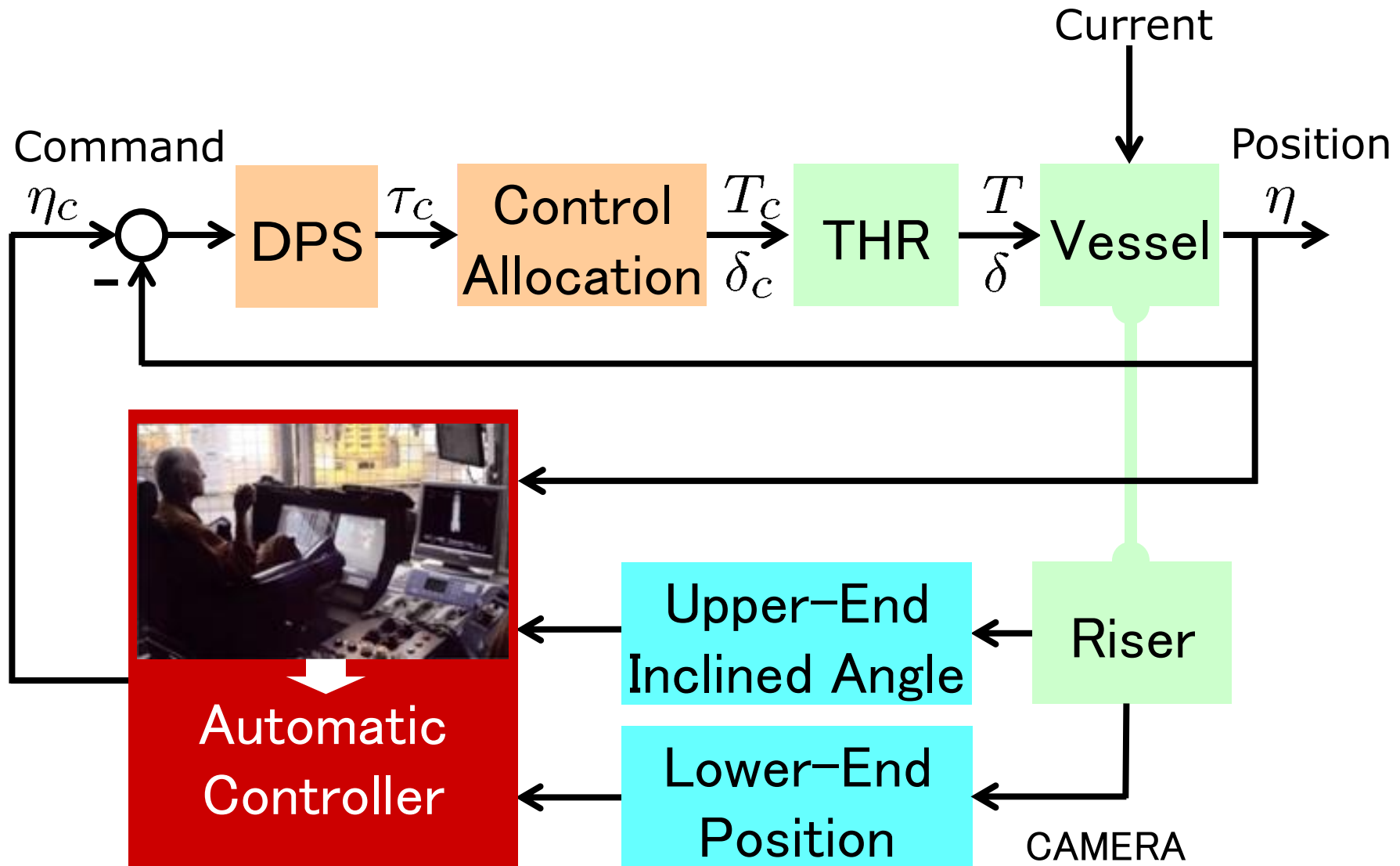
CHIKYU: Landing Operation



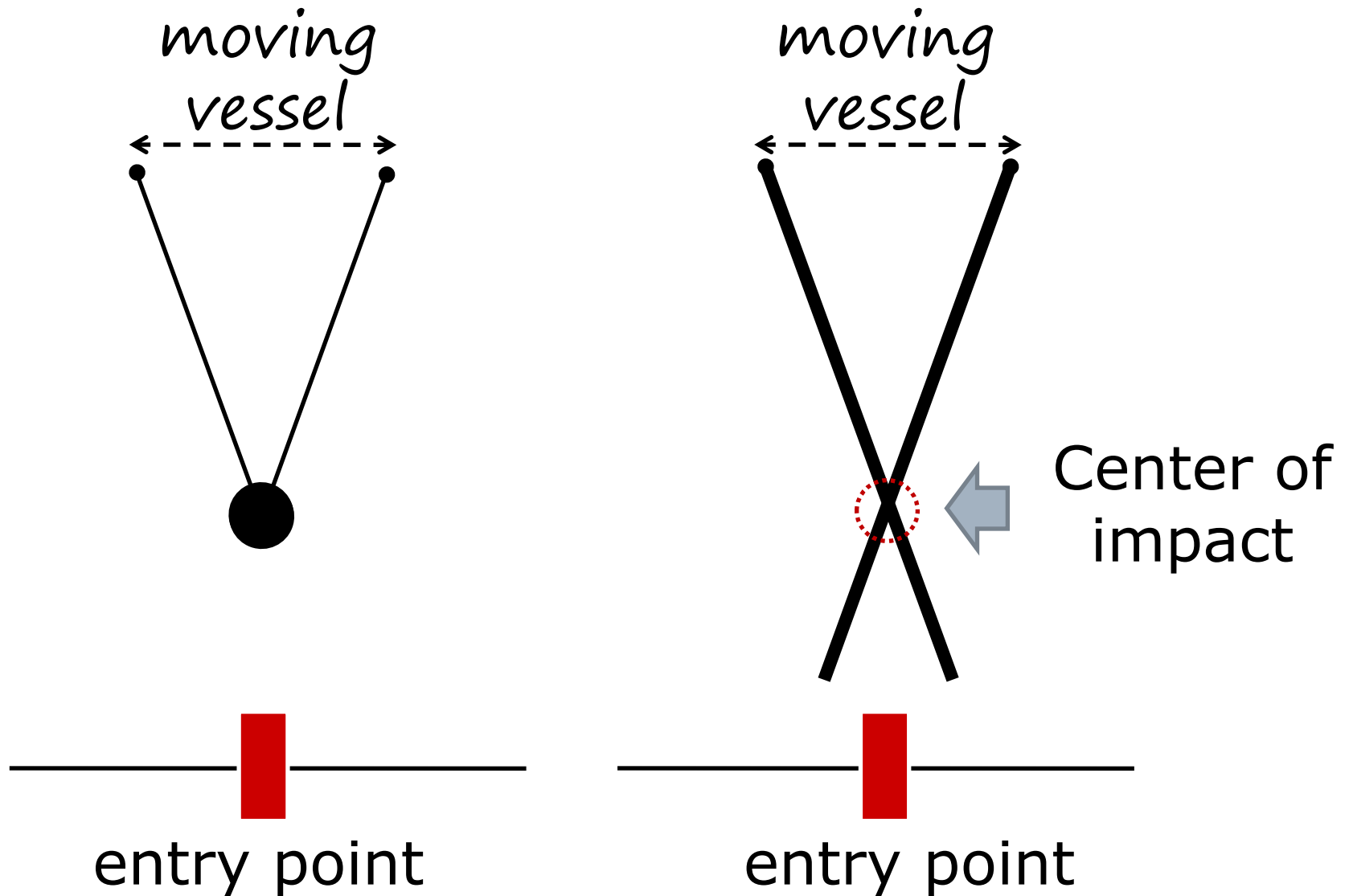
CHIKYU: Reentry Operation



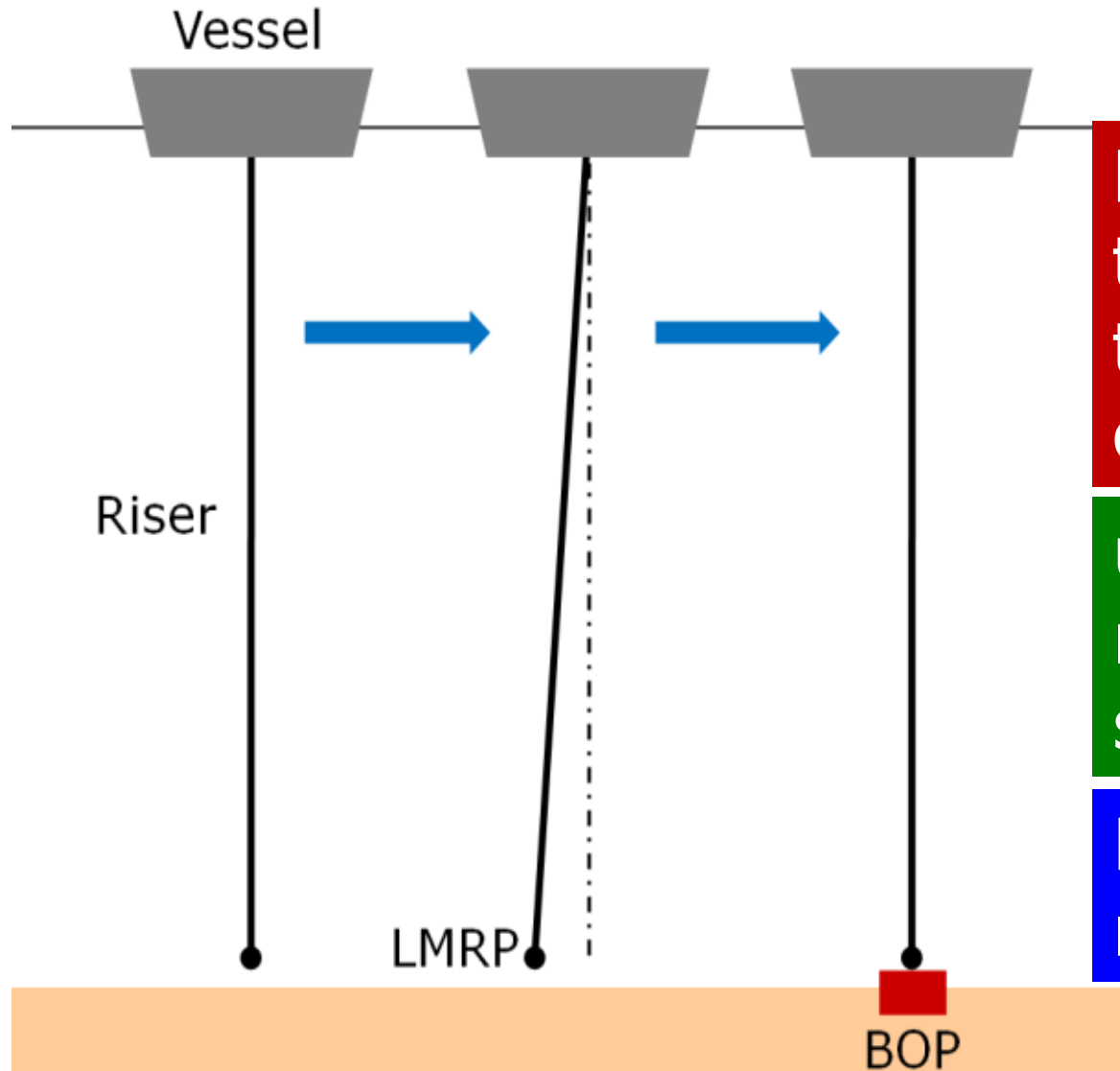
CHIKYU: Reentry Control System



Why the reentry op is difficult?



Reentry Control Problem



How to realize
the stability and
the performance
of reentry control

under no wind,
no current and
surface current

DPS not to be
modified

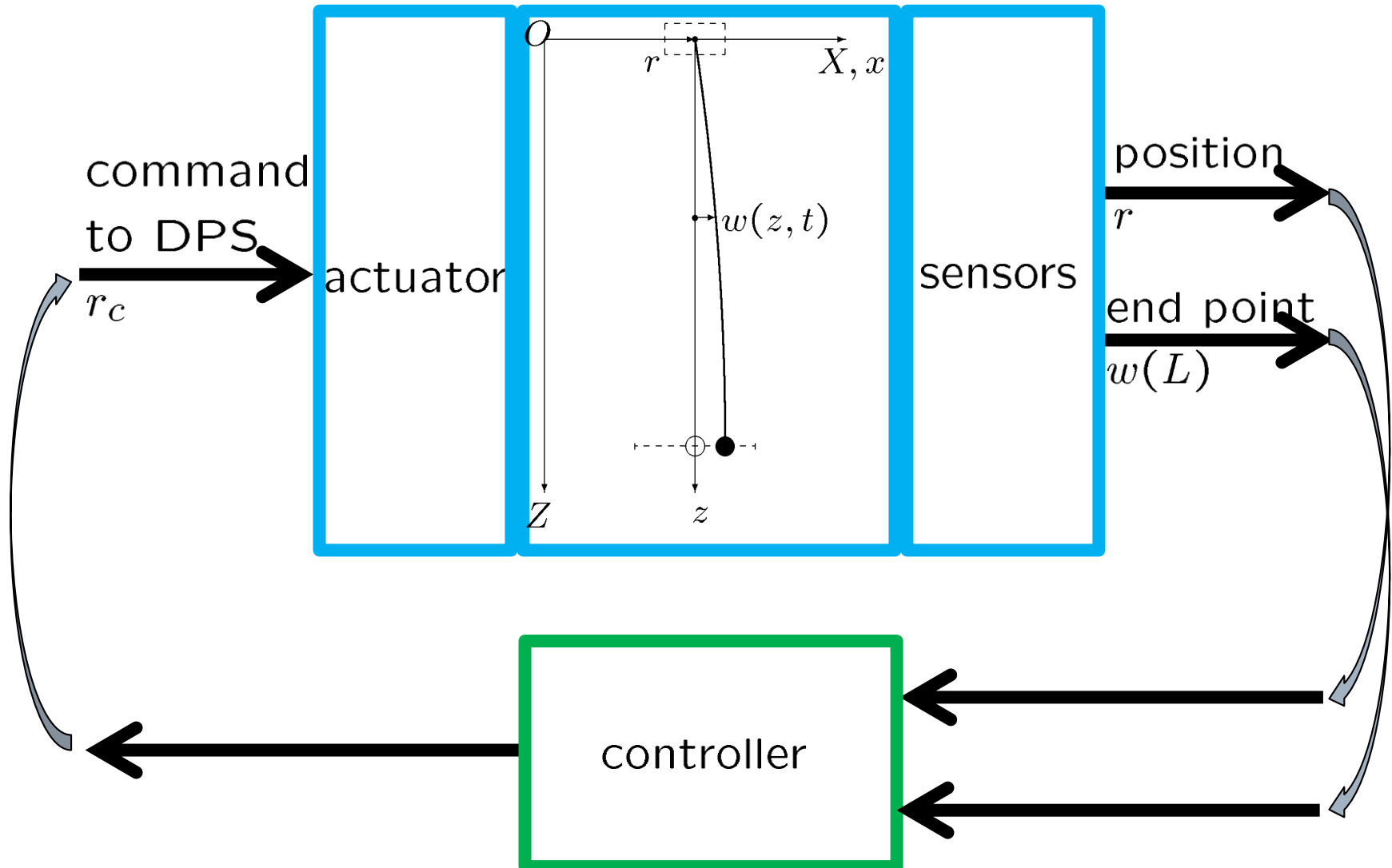
Control System for a Riser

manipulated
variable

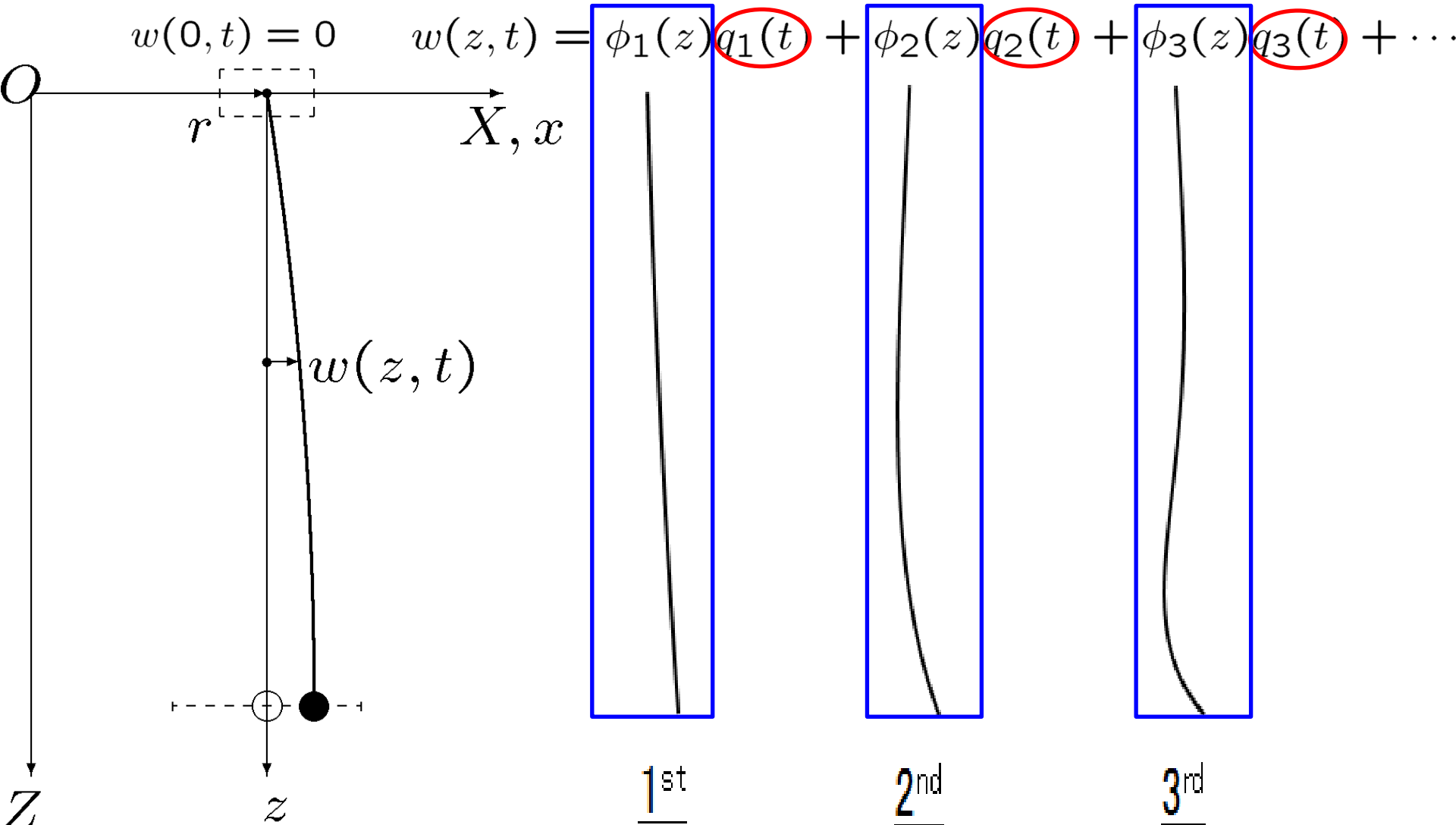
state variables

$r, q_1, q_2, \dots, \dot{r}, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots$

measured
variables



State Variables q_1, q_2, \dots



Motion Equation

~~$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_r \\ F_q \end{bmatrix}$$~~

$$M_{11} = M_s + M_b + (\tilde{m} + m_a)L$$

$$M_{12} = \int_0^L (\tilde{m} + m_a) \phi^T(z) dz + M_b \phi^T(L)$$

$$M_{21} = \int_0^L (\tilde{m} + m_a) \phi(z) dz + M_b \phi(L)$$

$$M_{22} = \int_0^L (\tilde{m} + m_a) \phi(z) \phi^T(z) dz + M_b \phi(L) \phi^T(L)$$

$$D_{11} = \int_0^L \zeta_d |V_{rel}| dz$$

$$D_{12} = \int_0^L \zeta_d |V_{rel}| \phi^T(z) dz \quad (V_{rel}(z) = \dot{r} + \dot{w}(z) - V_c(z))$$

$$D_{21} = \int_0^L \zeta_d |V_{rel}| \phi(z) dz$$

$$D_{22} = \int_0^L \zeta_d |V_{rel}| \phi(z) \phi^T(z) dz$$

$$K_{22} = M_b g \phi(L) \phi'^T(L) + \int_0^L \phi(z) (\mu(z - \tilde{L}) \phi'^T(z))' dz$$

Velocity Input Model

$$M_{21}\ddot{r} + M_{22}\ddot{q} + D_{21}\dot{r} + D_{22}\dot{q} + K_{22}q = F_q$$

$$\Downarrow \quad M_{21} = \text{diag}\{M_{21}(1), \dots, M_{21}(N)\}, \mathbf{1}_N = [1, \dots, 1]^T$$

$$\underbrace{\mathbf{1}_N \ddot{r}}_{\ddot{\xi}} + \underbrace{M_{21}^{-1} M_{22} \ddot{q}}_{-A_{22}} + \underbrace{M_{21}^{-1} D_{22} M_{22}^{-1} M_{21} (\mathbf{1}_N \dot{r} + M_{21}^{-1} M_{22} \dot{q})}_{\dot{\xi}}$$

$$+ \underbrace{M_{21}^{-1} K_{22} M_{22}^{-1} M_{21} (\mathbf{1}_N r + M_{21}^{-1} M_{22} q)}_{-A_{21}} - \underbrace{M_{21}^{-1} K_{22} M_{22}^{-1} M_{21} \mathbf{1}_N r}_{A_{23}}$$

$$= \underbrace{(M_{21}^{-1} D_{22} M_{22}^{-1} M_{21} \mathbf{1}_N - M_{21}^{-1} D_{21})}_{B_2} \dot{r} + \underbrace{M_{21}^{-1} F_q}_{w_2}$$

$$\ddot{\xi} = A_{21}\xi + A_{22}\dot{\xi} + A_{23}r + B_2\dot{r} + w_2$$

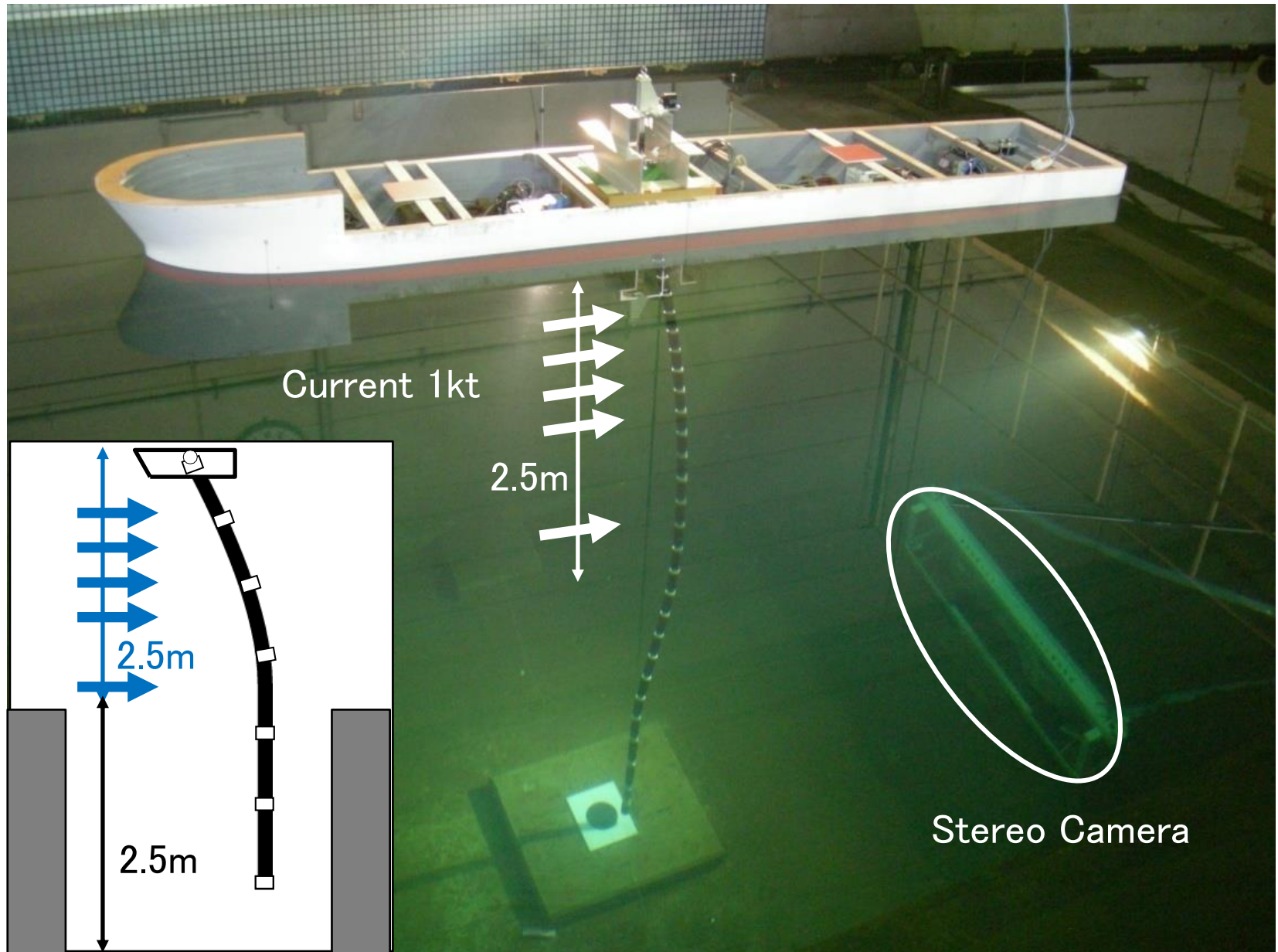
$$\Downarrow \quad q = M_{22}^{-1} M_{21} (\xi - \mathbf{1}_N r)$$

velocity
input

varying
parameter

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \\ r \end{bmatrix}}_{\dot{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I_N & 0 \\ A_{21} & A_{22}(|V_{rel}|) & A_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \\ r \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ B_2(|V_{rel}|) \\ 1 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\dot{r}}_u + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ w_2 \\ 0 \end{bmatrix}}_w$$

Experimental Set Up (5m)

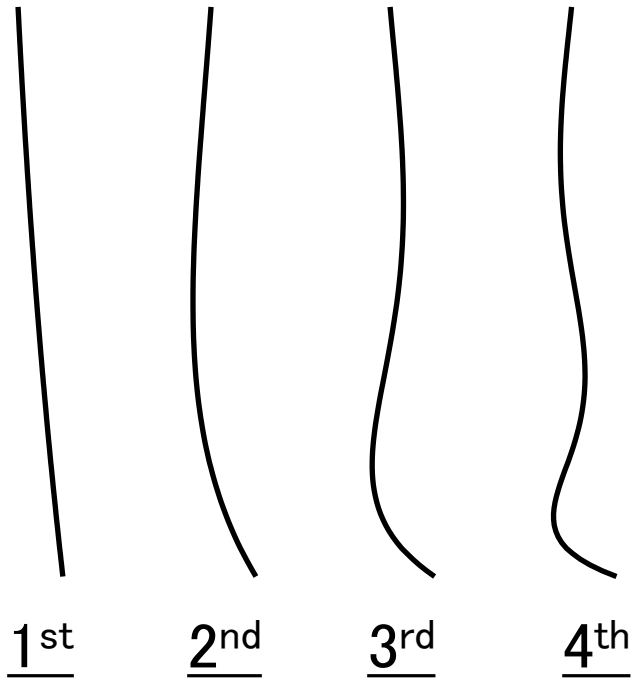


Riser Pipe Unit Model (5m)

CHIKYU: 210 m length

Vessel Model: 3.8 m length

Scaling factor : **1/55**



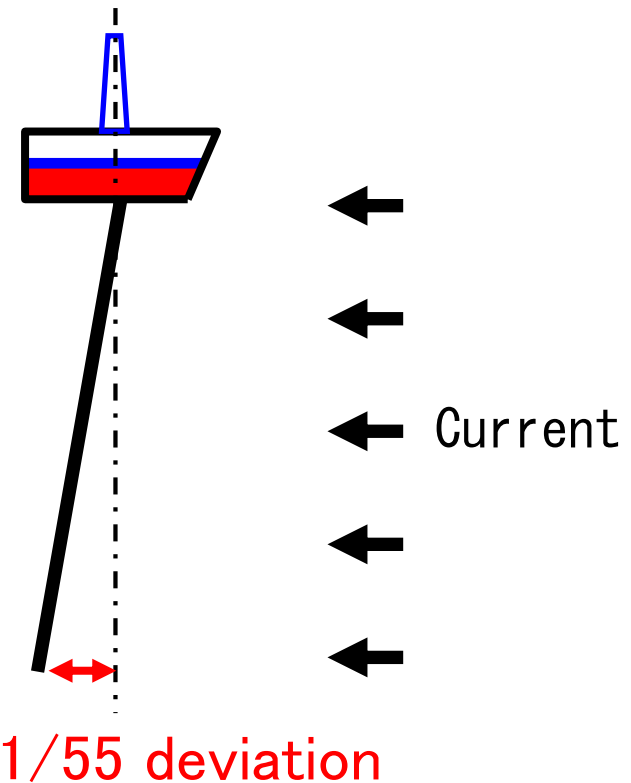
1/√55 period

Dynamic Similarity

Riser: 2500 m length

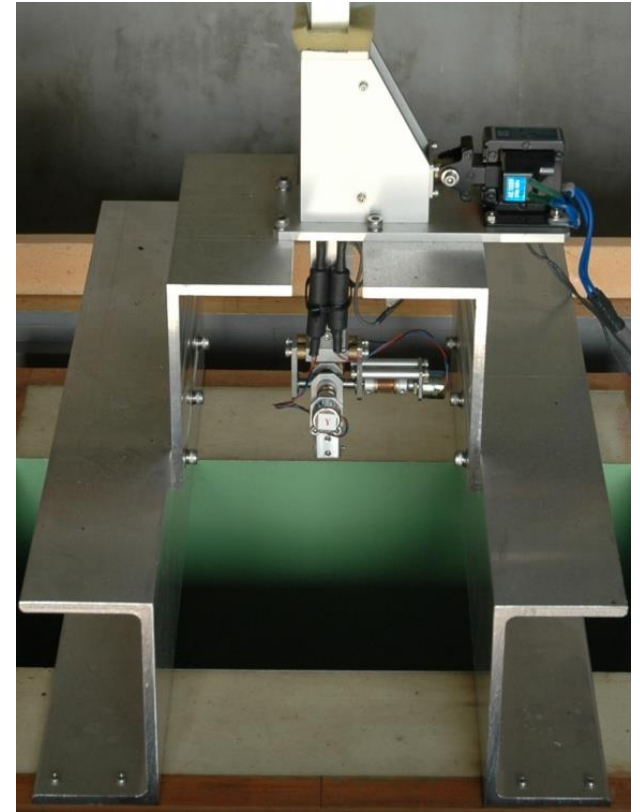
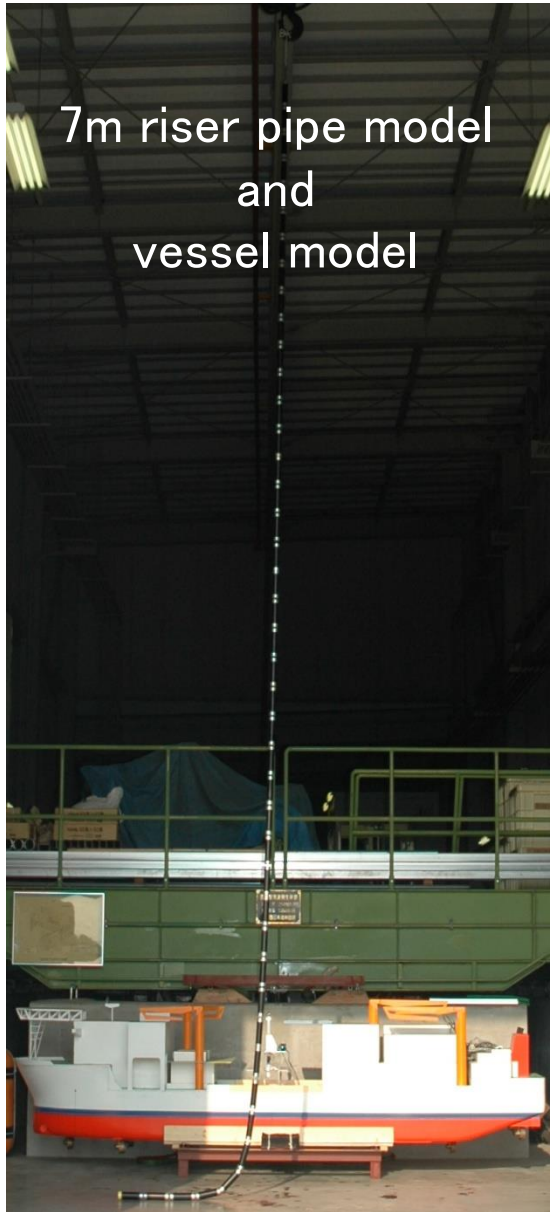
Riser Model: 4.8 m length

Scaling factor : **1/500**



Geometric Similarity

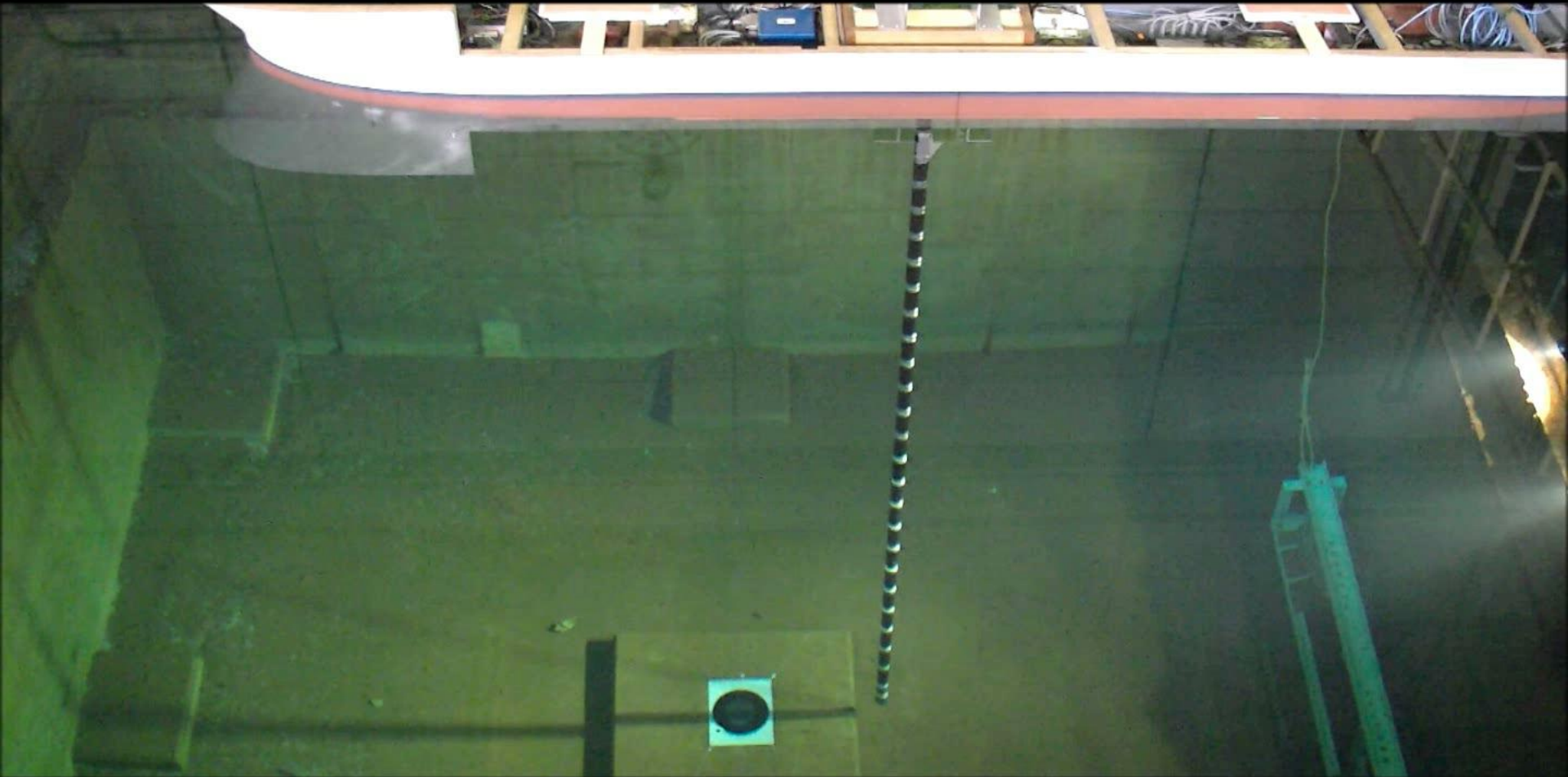
Experimental Parts



Exp# 1 (No Control for Riser)

[250]

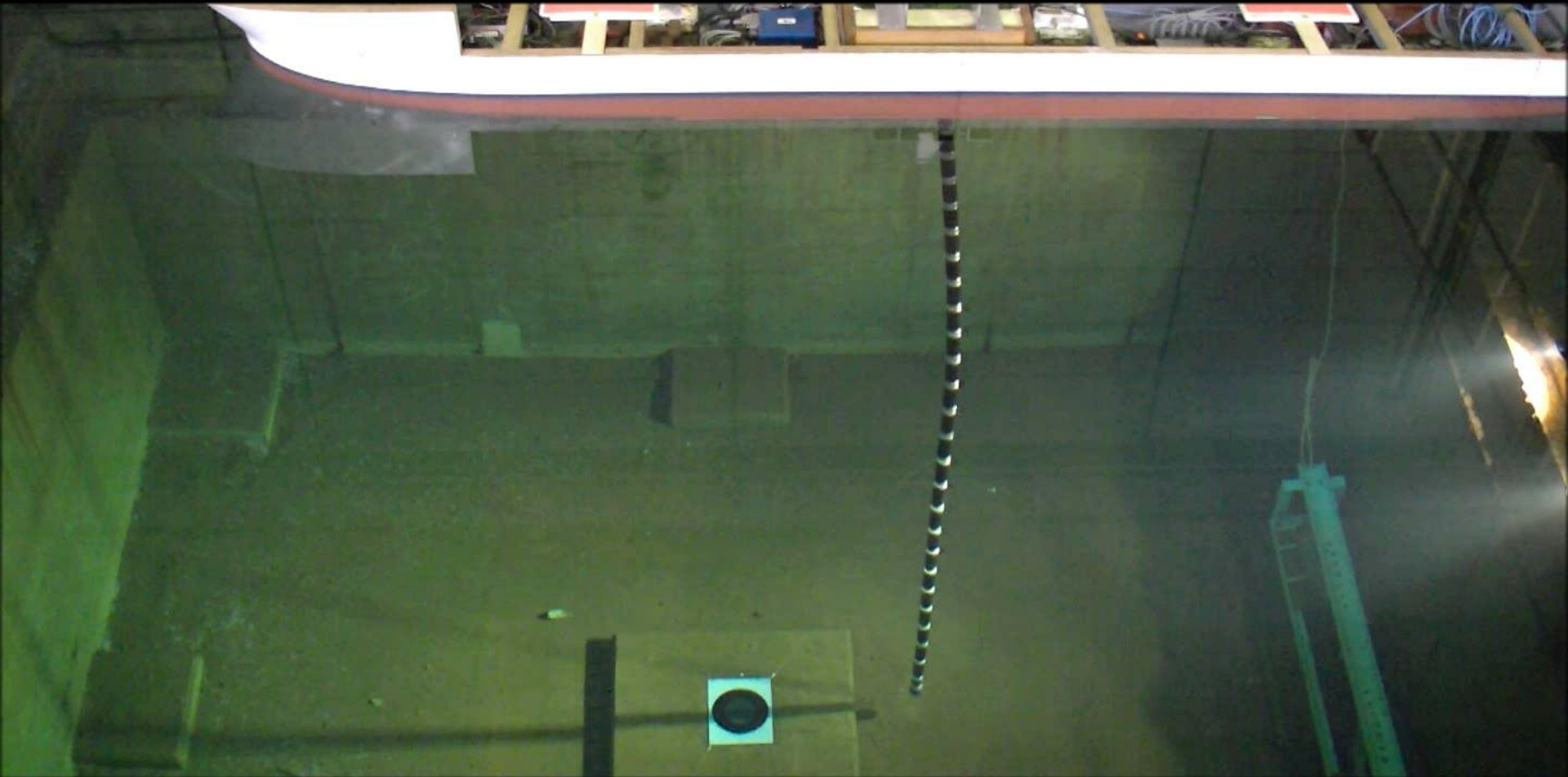
4



Exp#2 (No Control with Current)

[251]

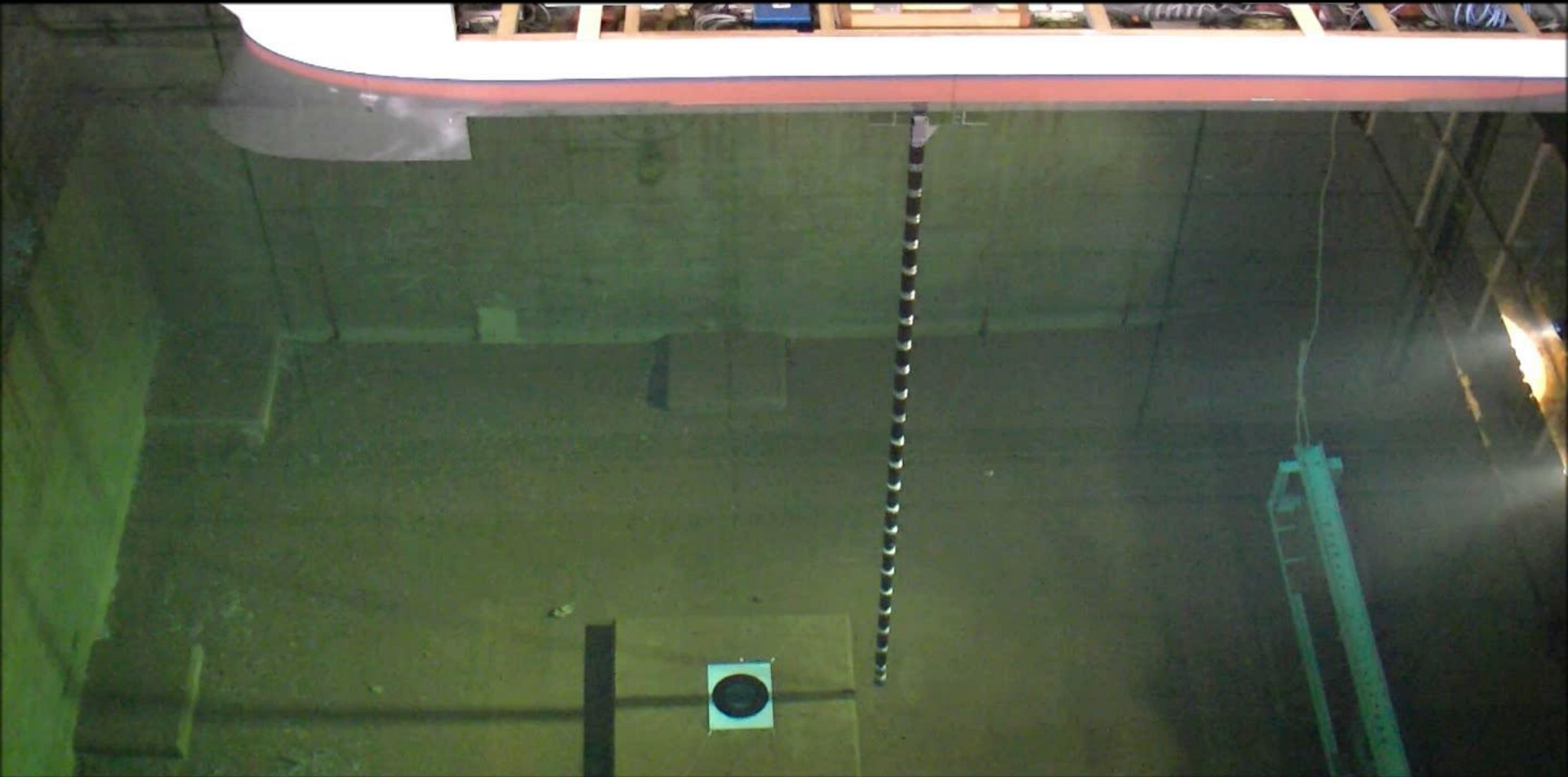
4



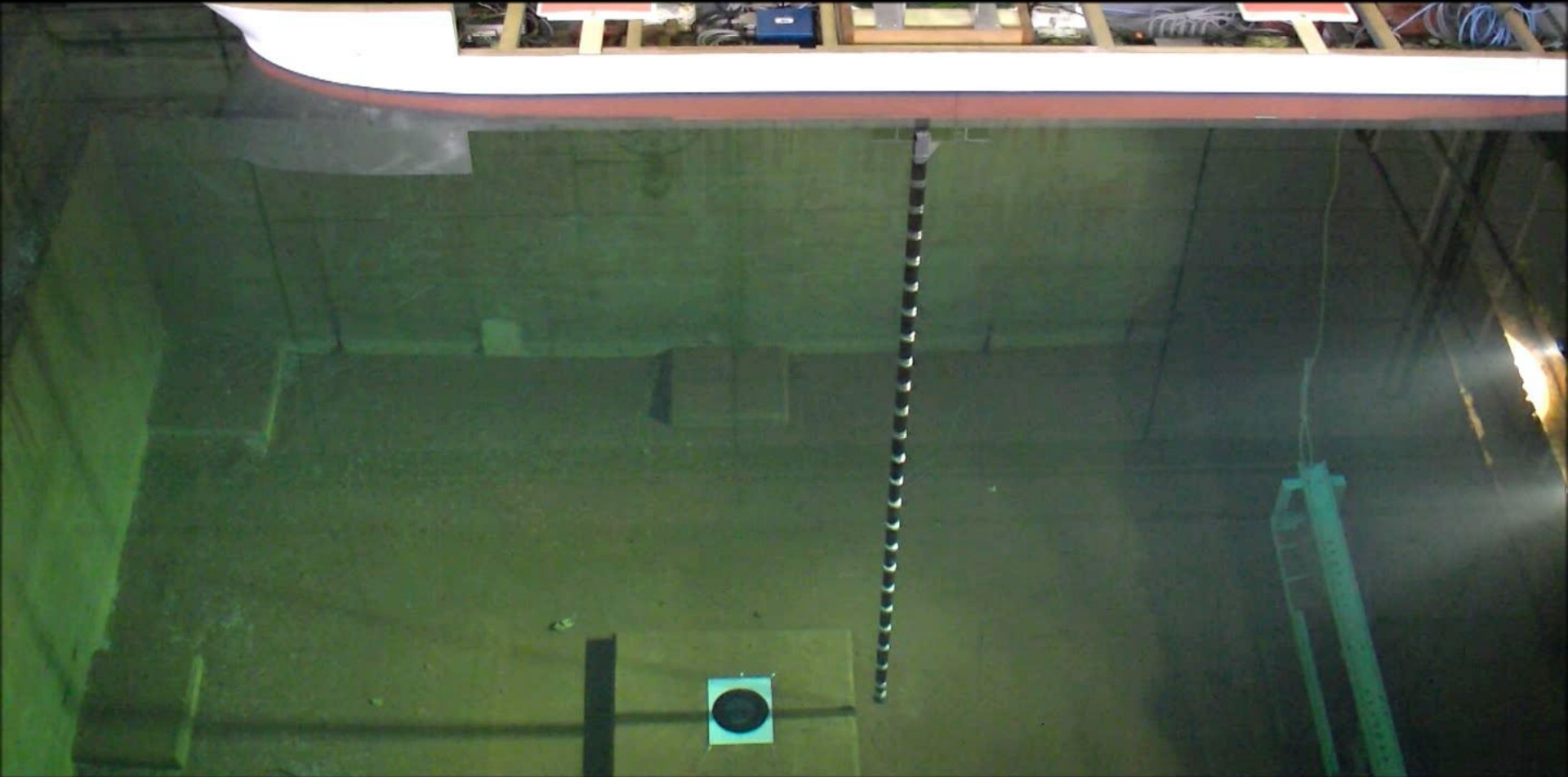
Exp#3 (Unity Feedback)

[252]

4



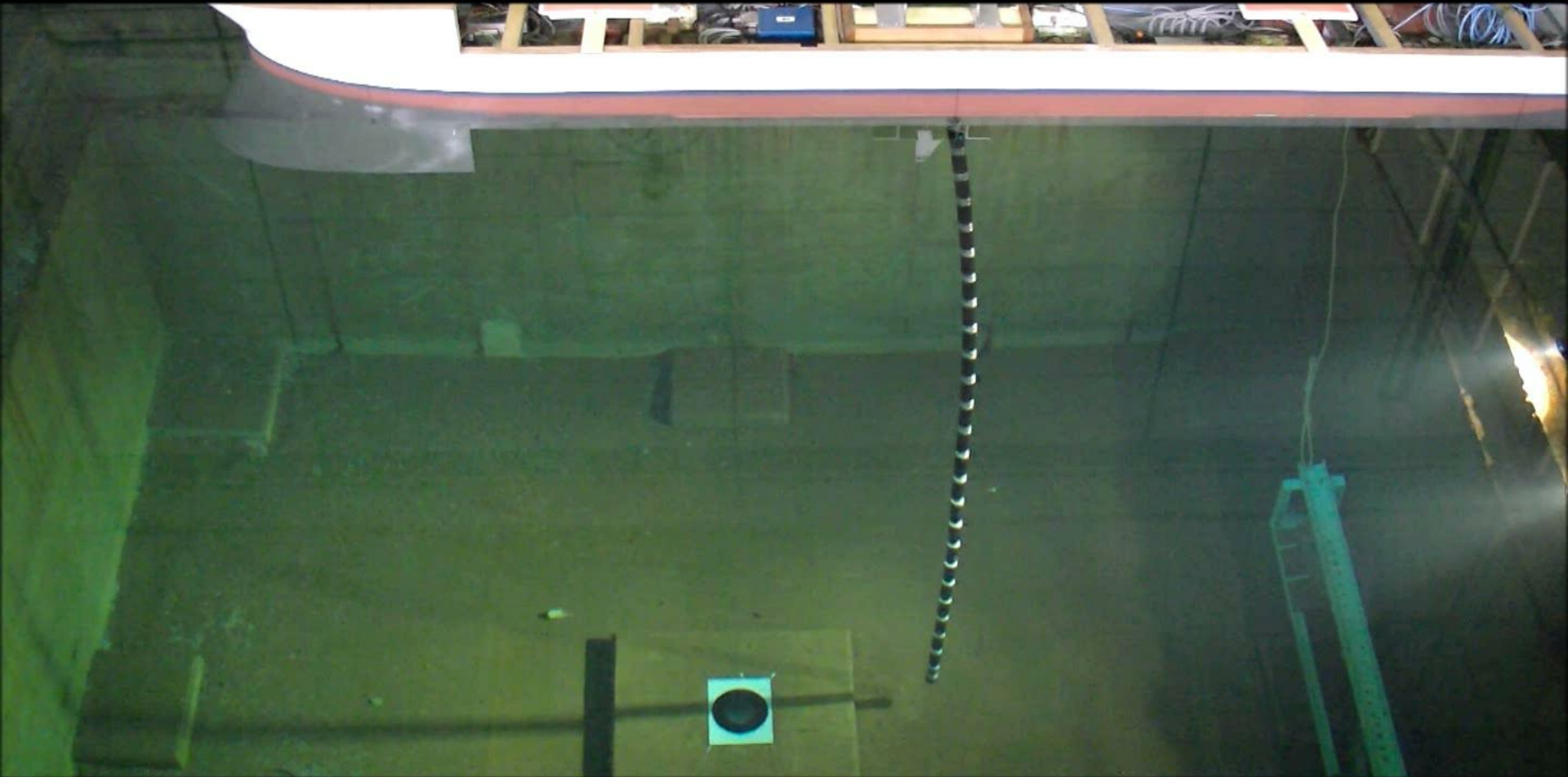
Exp#4 (LQI Control)



Exp#5 (LQI Control with Current)

[254]

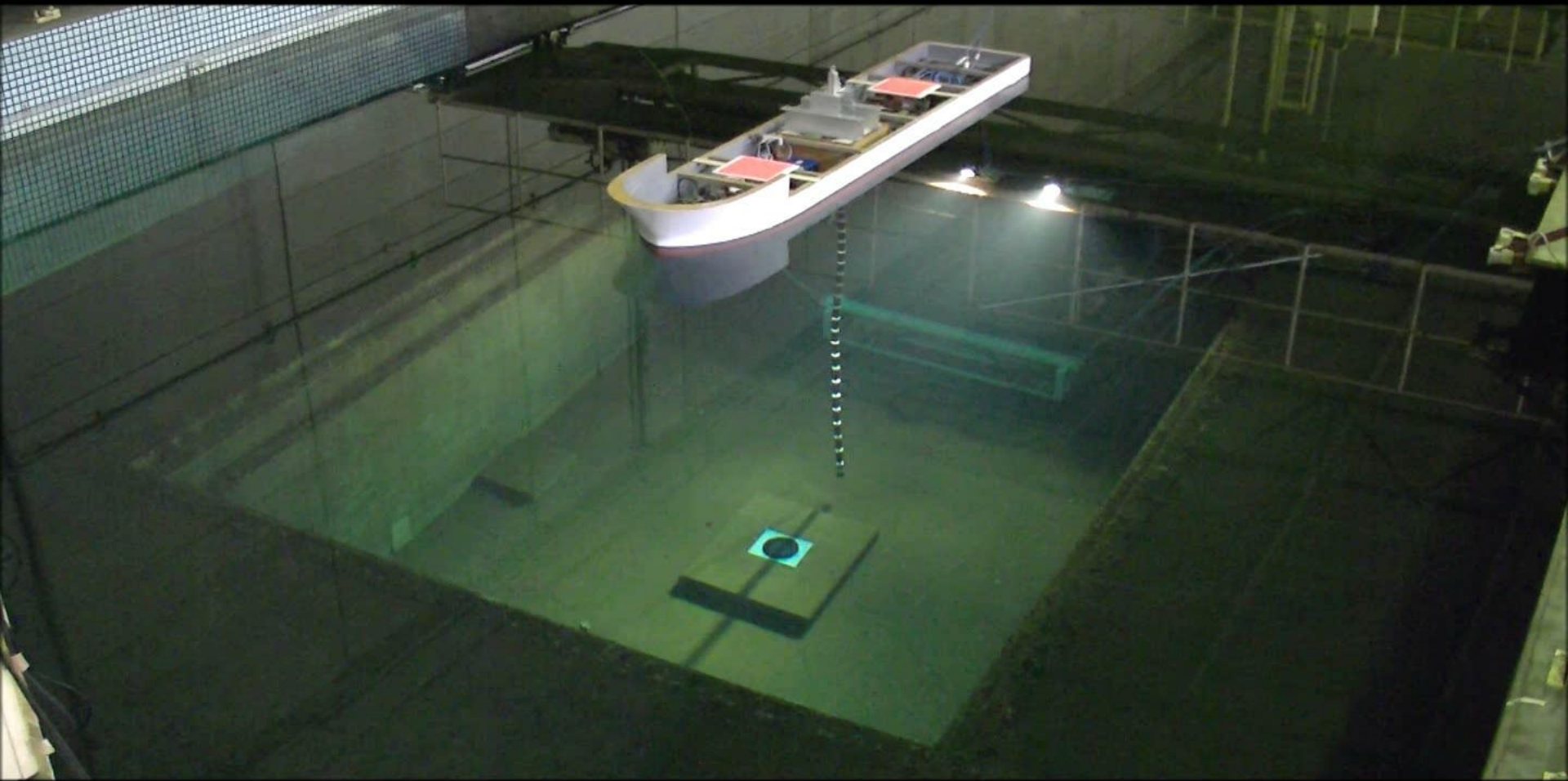
4



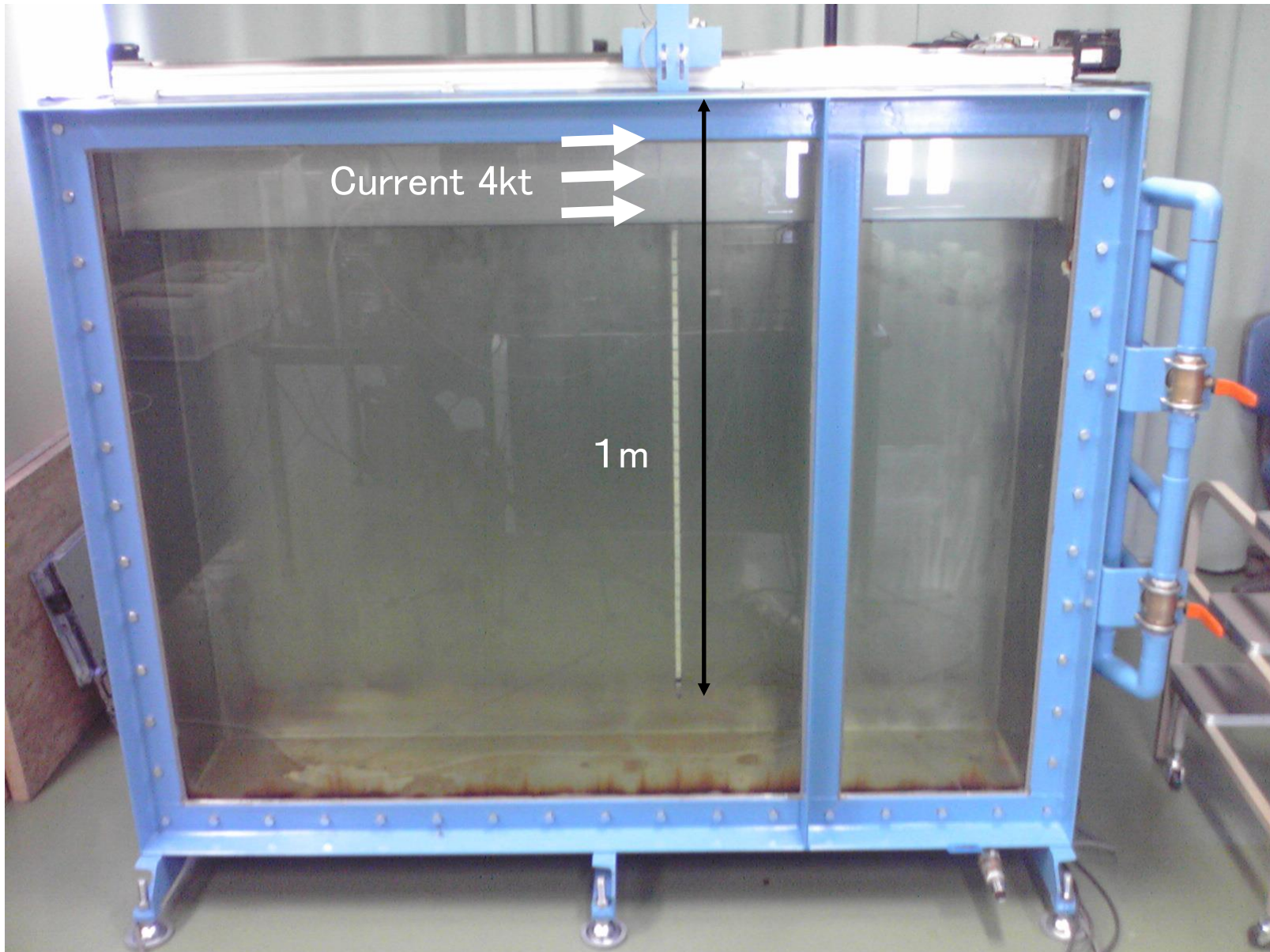
Exp#6 (Overview)

[255]

4



Experimental Set Up (1m)

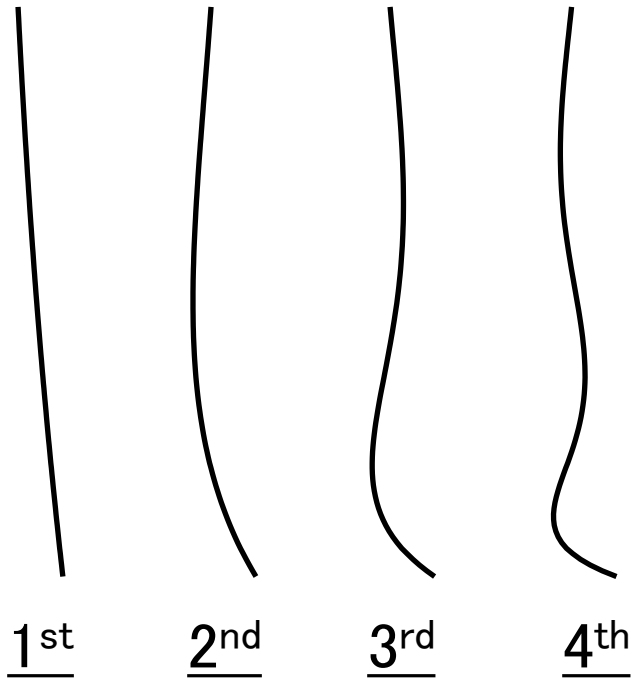


Riser Pipe Unit Model (1m)

CHIKYU: 210 m length

Assumed Vessel Model: 0.2 m length

Scaling factor : **1/1000**



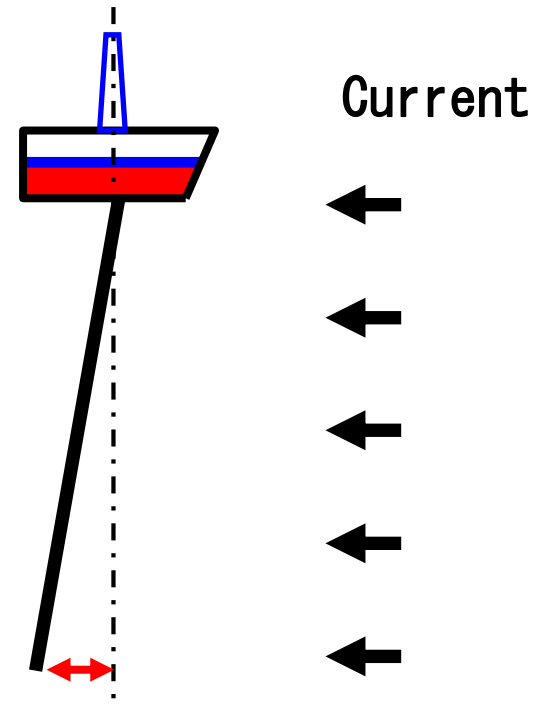
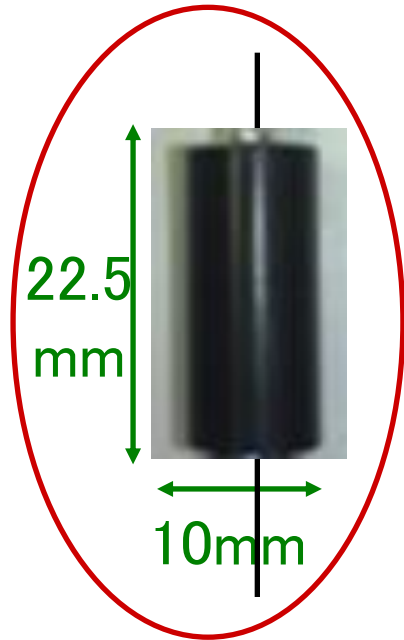
$1/\sqrt{1000}$ period

Dynamic Similarity

Riser: 2500 m length

Riser Model: 1 m length

Scaling factor : **1/2500**



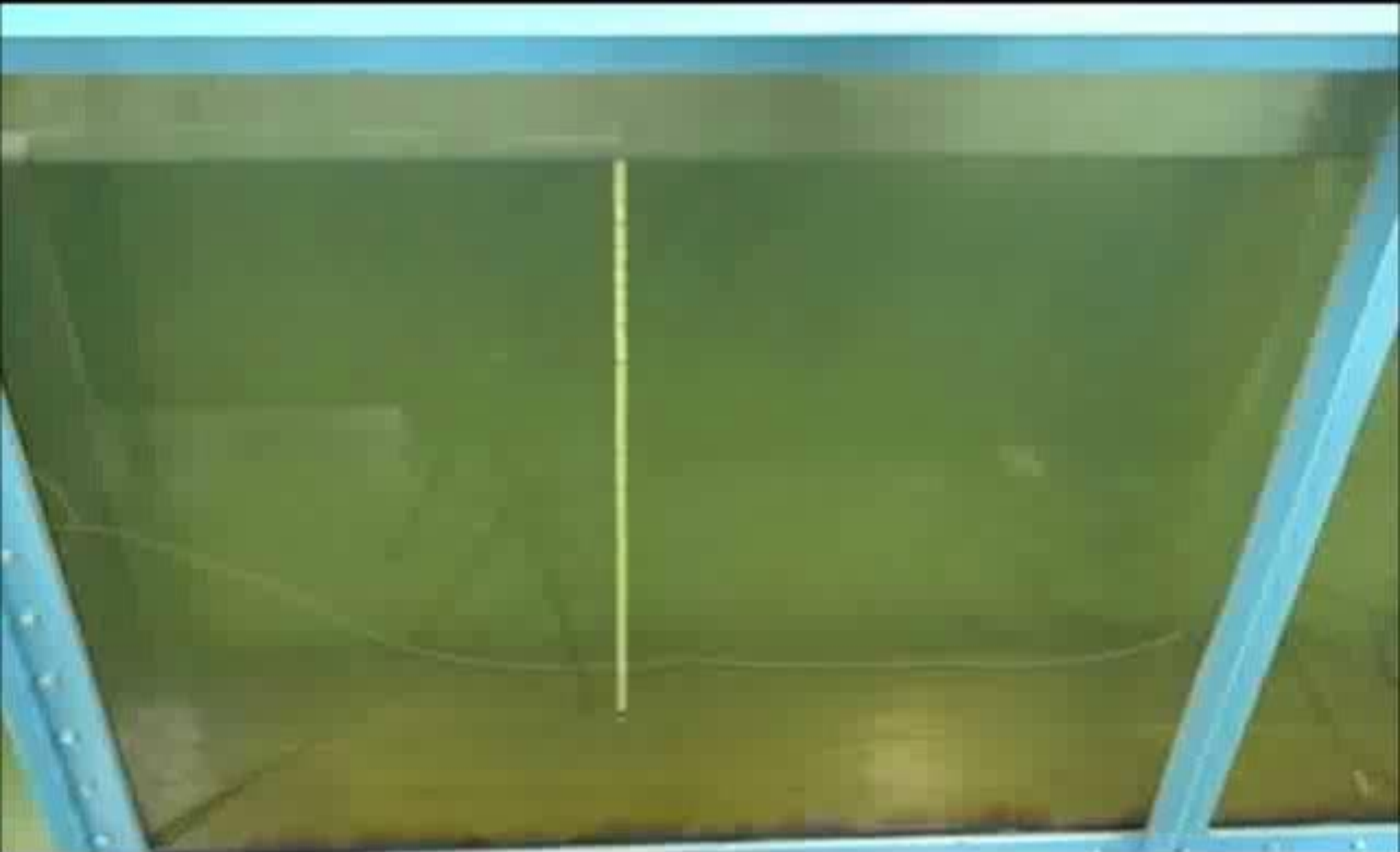
$1/1000$ deviation

Geometric Similarity

Experiments by 1m riser model

[258]

4



Outline

1 LQI Control

Linear-Quadratic-Integral Design of Linear-Time-Invariant Control

2 LPV Control

Linear-Matrix-Inequality Based Design of Linear-Parameter-Varying Control

Applications

3 Underwater Vehicle

4 Flexible Riser

5 Azimuth thrusters

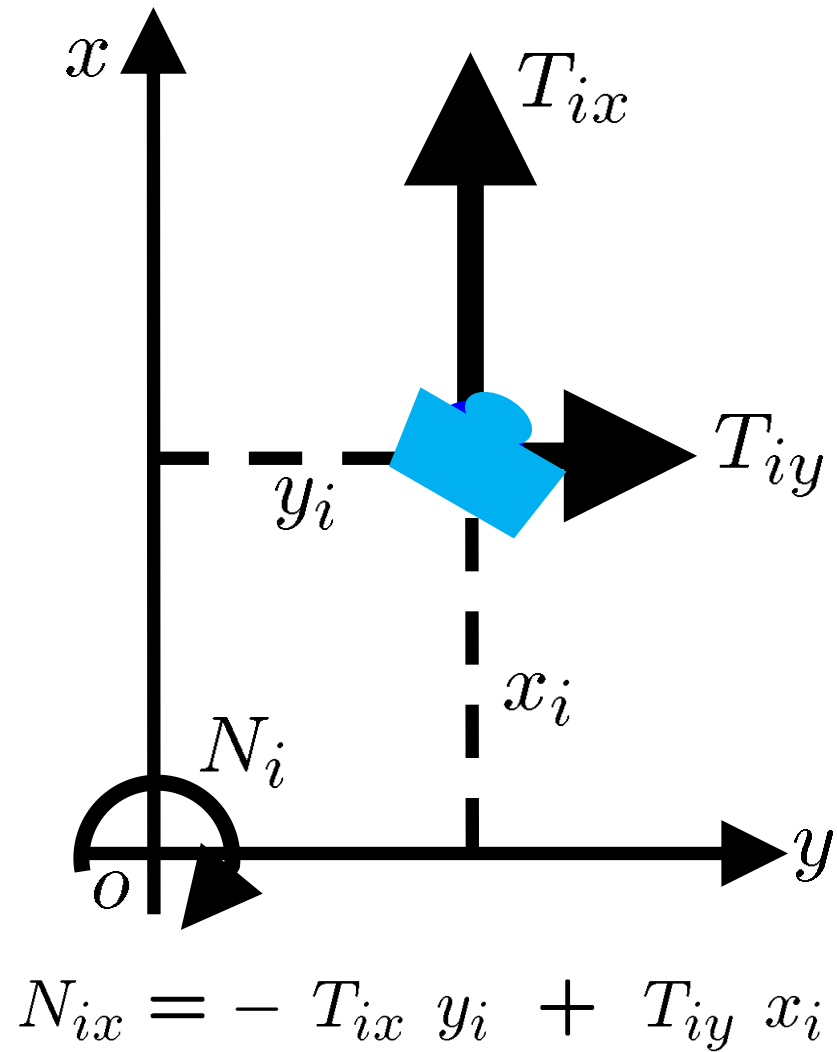
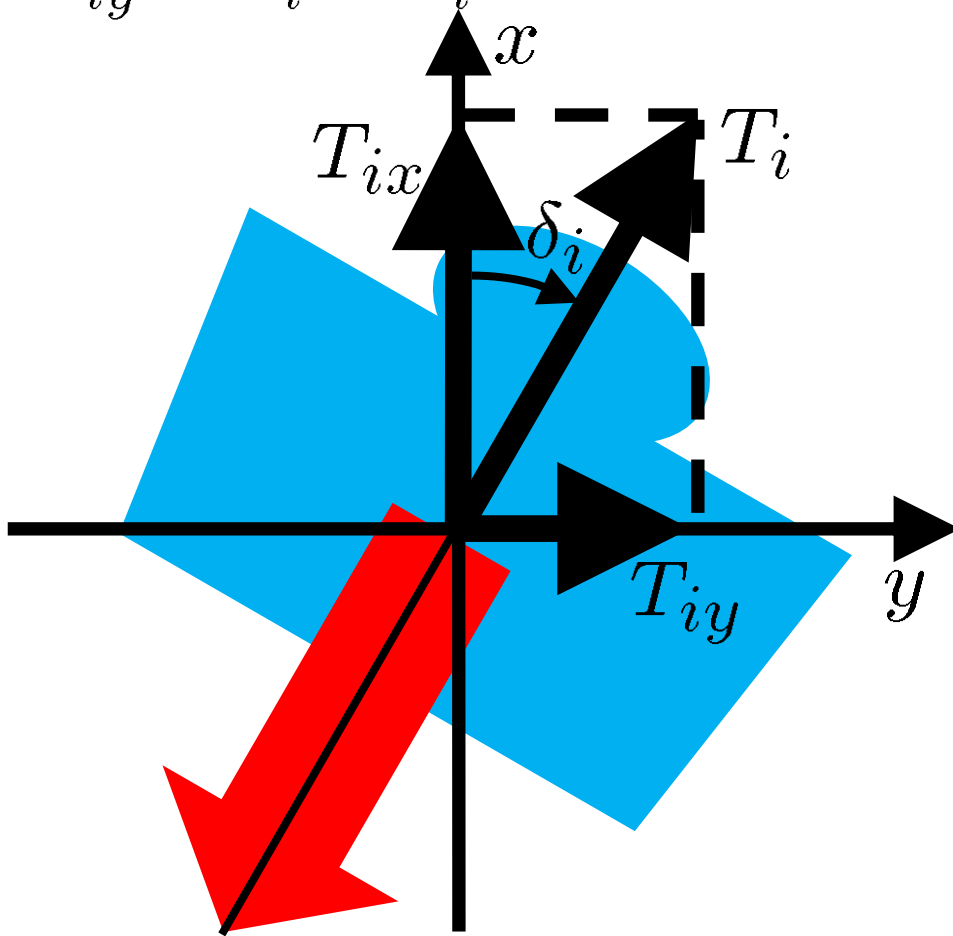
6 Nomoto's Model

7 Wind Turbine

50] Thrust Components and Moment

$$T_{ix} = T_i \cos \delta_i$$

$$T_{iy} = T_i \sin \delta_i$$



51] CA Equation

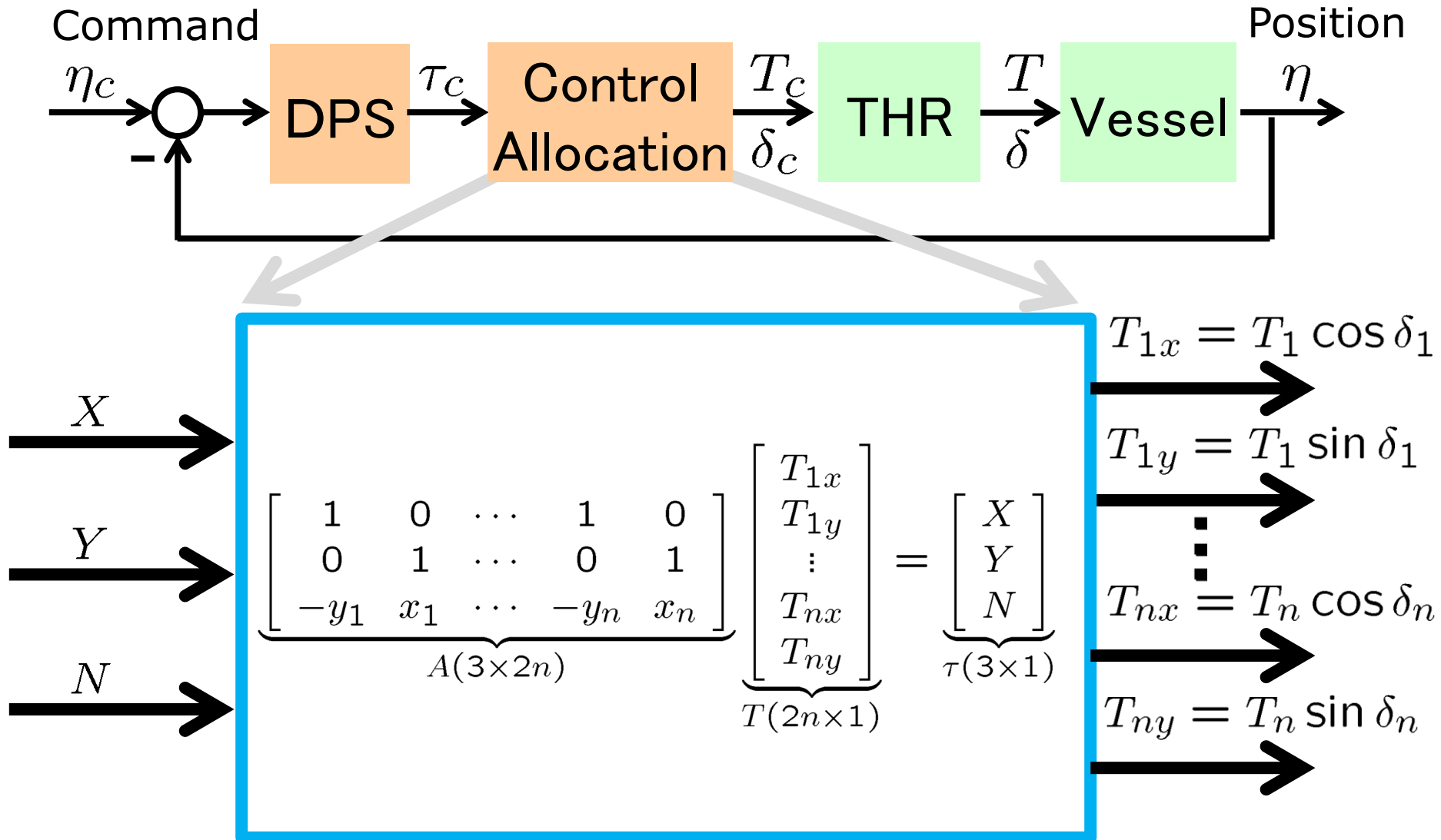
$$T_{1x} + T_{2x} + \cdots + T_{nx} = \sum_{i=1}^n T_{ix} = X$$

$$T_{1y} + T_{2y} + \cdots + T_{ny} = \sum_{i=1}^n T_{iy} = Y$$

$$N_1 + N_2 + \cdots + N_n = \sum_{i=1}^n (-T_{ix} y_i + T_{iy} x_i) = N$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 1 \\ -y_1 & x_1 & \cdots & -y_n & x_n \end{bmatrix}}_{A(3 \times 2n)} \underbrace{\begin{bmatrix} T_{1x} \\ T_{1y} \\ \vdots \\ T_{nx} \\ T_{ny} \end{bmatrix}}_{T(2n \times 1)} = \underbrace{\begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix}}_{\tau(3 \times 1)}$$

CA Problem



General Solution of CA Eq.

Singular Value Decomposition of A

$$A = U \underbrace{\begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \end{bmatrix}}_{\Sigma} \underbrace{\begin{bmatrix} V_1 & V_2 \end{bmatrix}}_{V^T}^T$$

General Solution of $AT = \tau$

$$T = V_1 \Sigma_1^{-1} U^T \tau + V_2 \textcircled{c} \rightarrow \text{arbitrary } (2n-3)\text{-vector}$$

Norm of T

$$\|T\|^2 = \|\Sigma_1^{-1} U^T \tau\|^2 + \|c\|^2$$

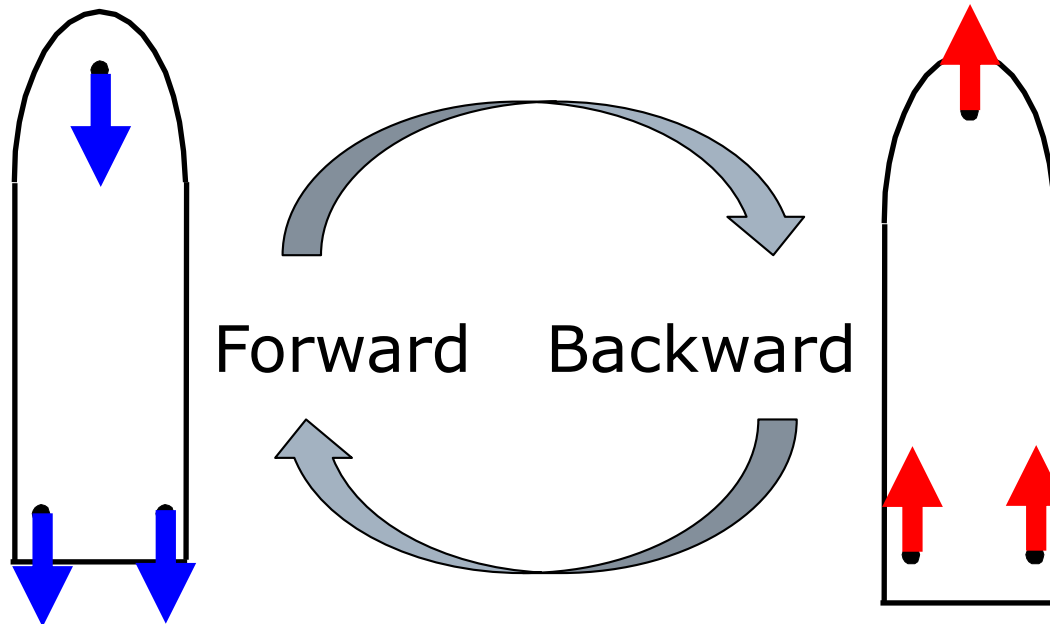
Minimization of $\|T\|$ ($c = 0$)

$$T^* = V_1 \Sigma_1^{-1} U^T \tau$$

Conventional Method

By norm minimization, each THR is apt to play the same role with the same thrust & direction.

Therefore for the small sign change under the weak disturbance, each THR must always rotate for the forward and backward commands.



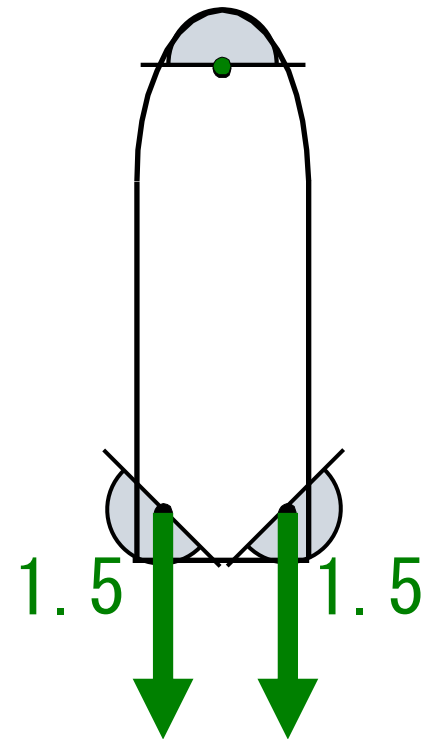
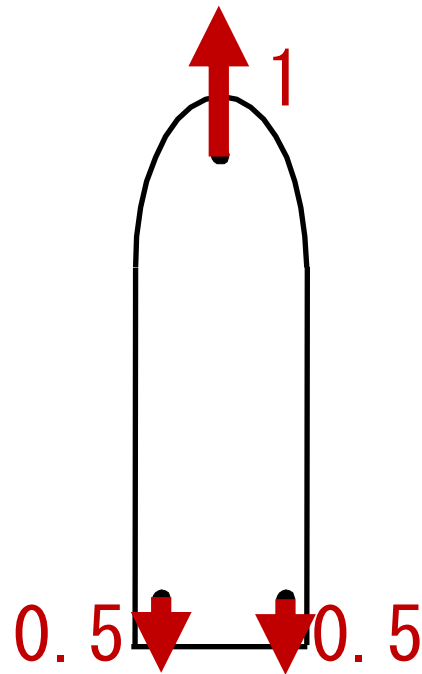
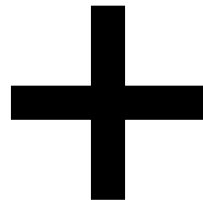
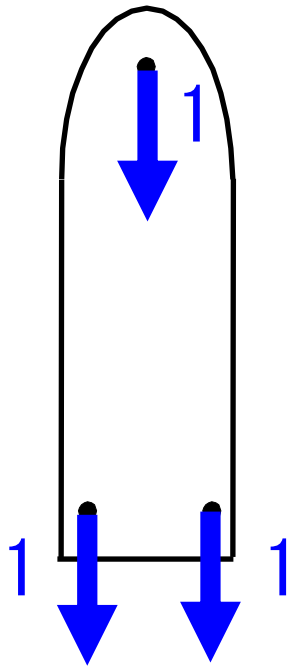
55] CA with Rotated Angle Constraints 5

Conventional

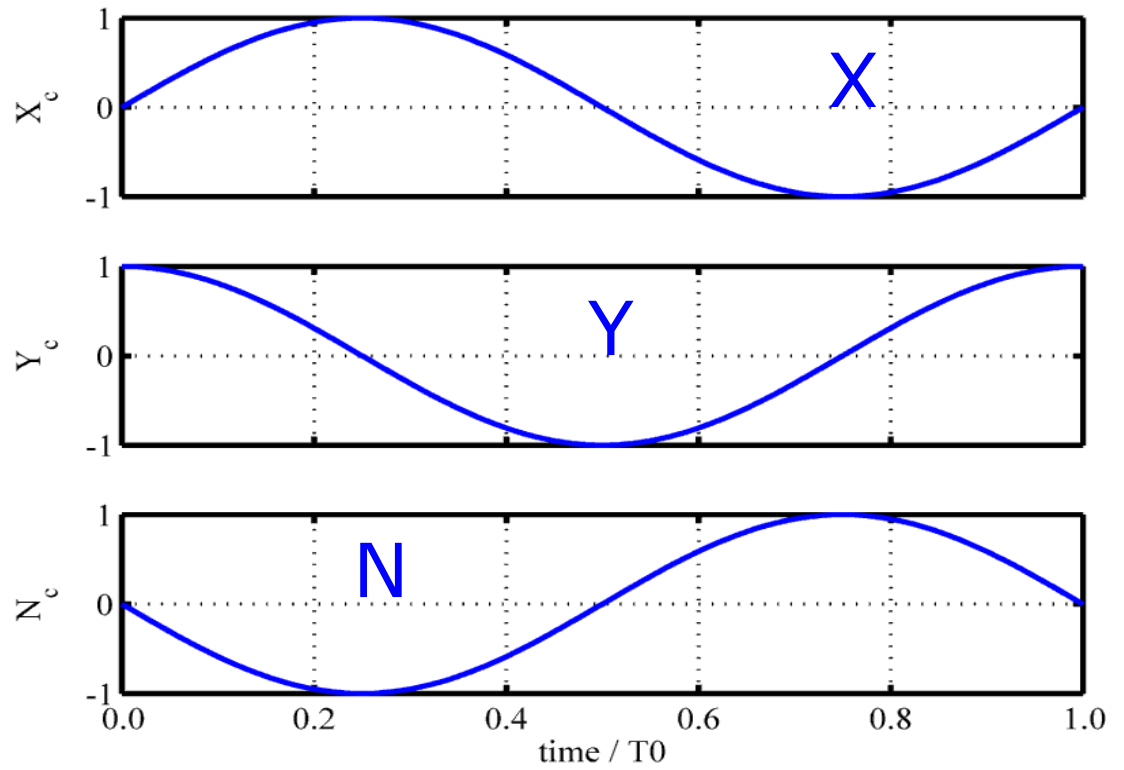
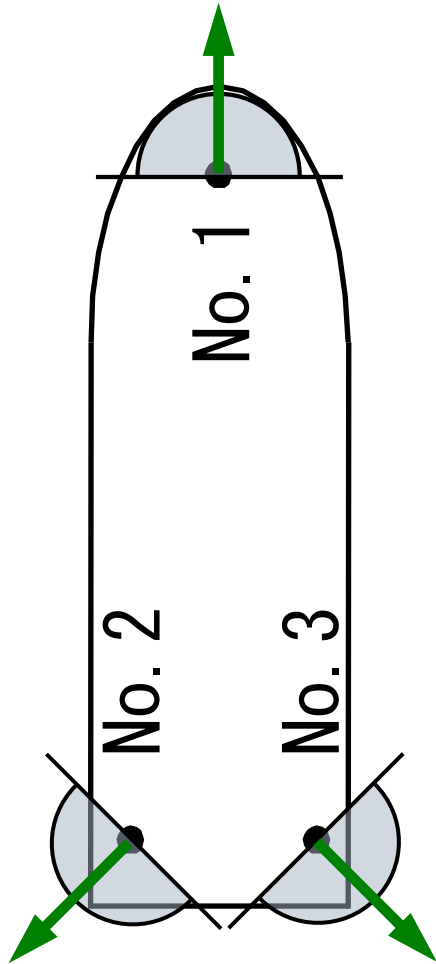
Compensation

Proposal

$$V_1 \Sigma_1^{-1} U^T \tau + V_2 c = T^*$$



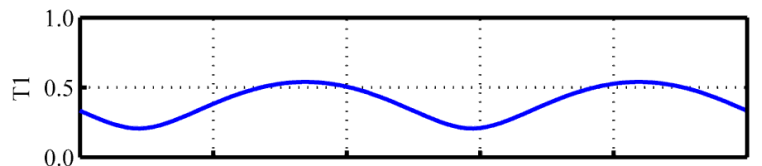
56] Toy Problem on CA



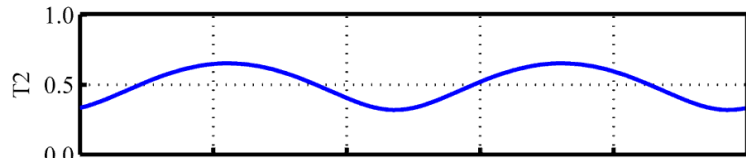
57] CA Simulation of Toy Problem

5

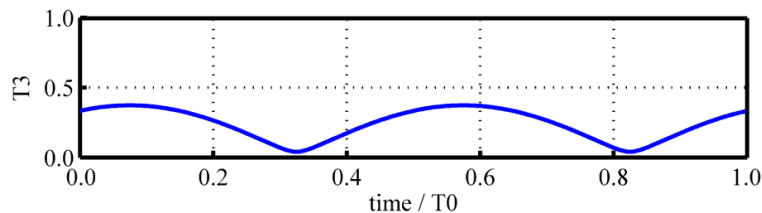
T1



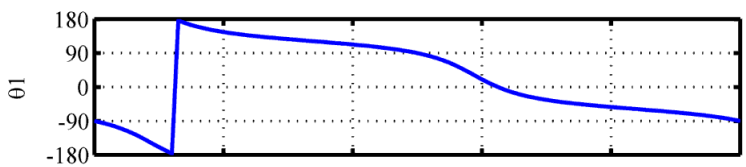
T2



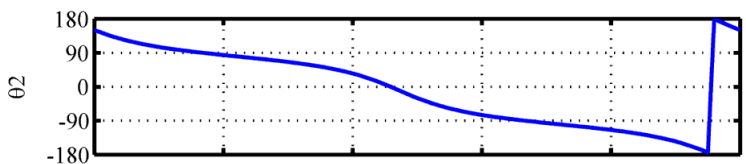
T3



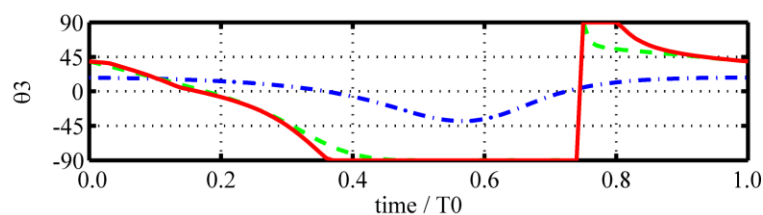
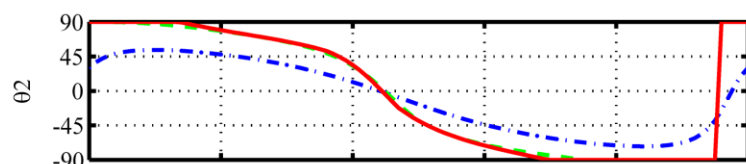
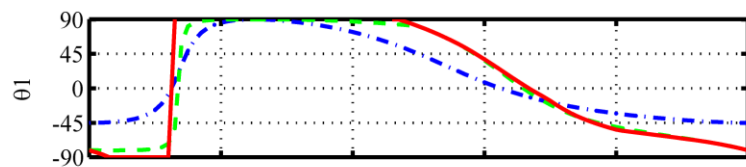
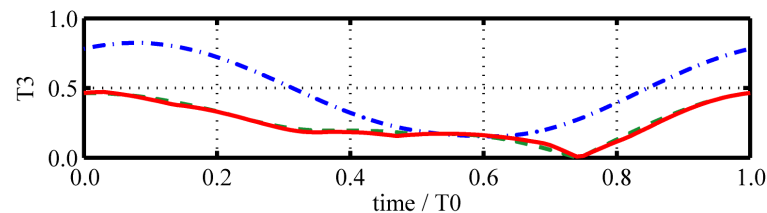
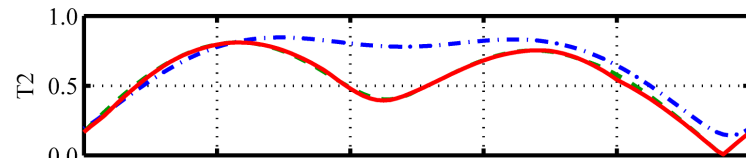
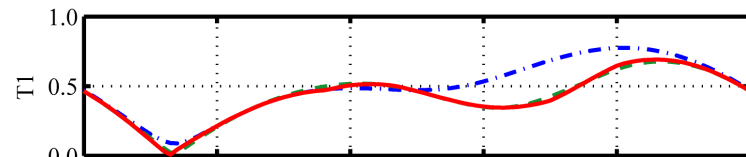
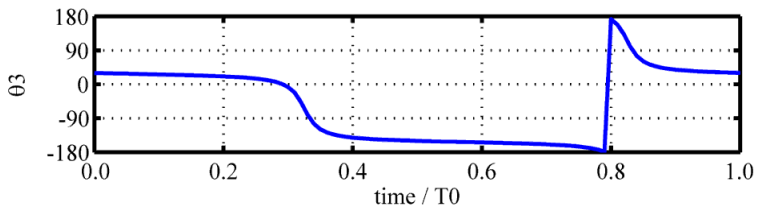
θ_1



θ_2



θ_3



58] CA Experiment (1)



59] CA Experiment (2)



Outline

1 LQI Control

Linear-Quadratic-Integral Design of Linear-Time-Invariant Control

2 LPV Control

Linear-Matrix-Inequality Based Design of Linear-Parameter-Varying Control

Applications

3 Underwater Vehicle

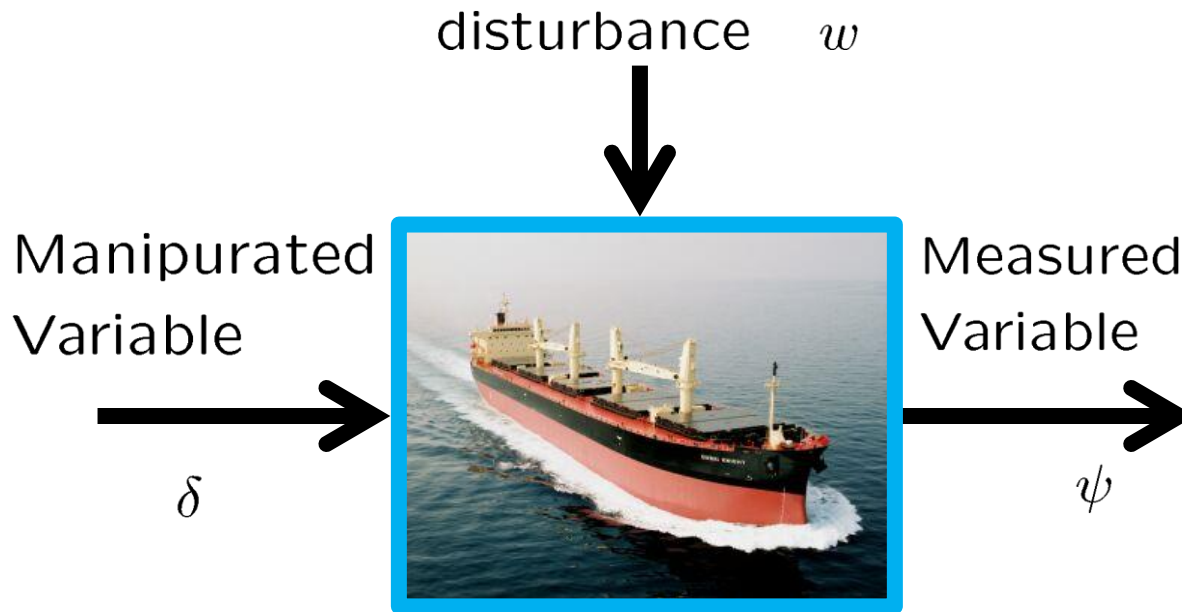
4 Flexible Riser

5 Azimuth thrusters

6 **Nomoto's Model**

7 Wind Turbine

MOMOTO Model



Time lag

$$\dot{r}(t) = -\frac{1}{T}r(t) + \frac{K}{T}\delta(t - t_L) + w(t)$$

where

$$T = \frac{L}{U}T', \quad K = \frac{U}{L}K' \quad (U_1 \leq U \leq U_2)$$

Parameter Uncertainty Velocity Variation

Scheduled MOMOTO Model

- Nomoto Model

$$\dot{r} = -\frac{1}{T}r + \frac{K}{T}\delta$$

where

$$T = \frac{L}{U}T', \quad K = \frac{U}{L}K'$$

- Nominal Speed $U_1 \leq U^* \leq U_2$

$$T^* = \frac{L}{U^*}T', \quad K^* = \frac{U^*}{L}K'$$

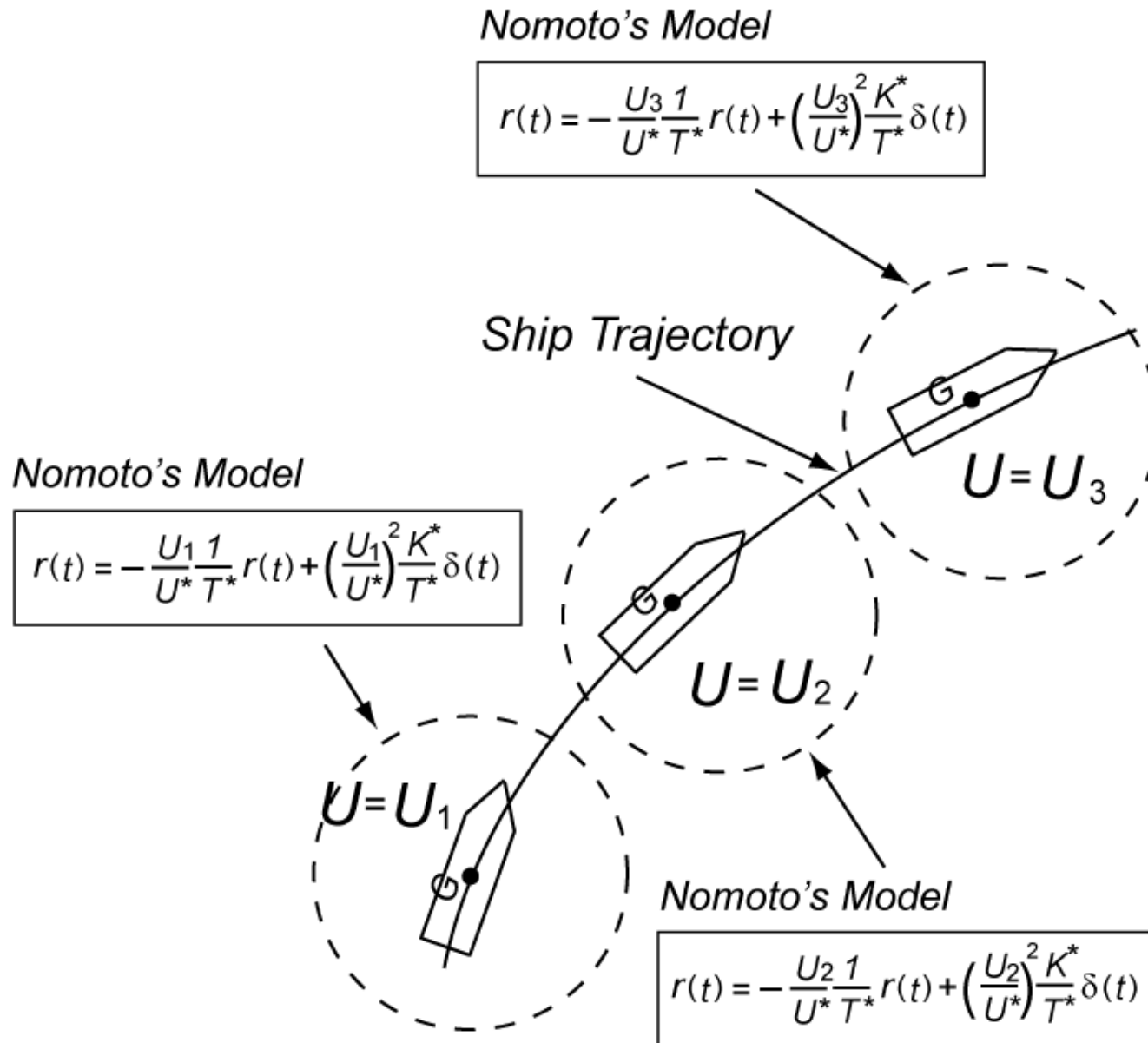
- Time Constant and Gain Constant

$$T = \frac{U^*}{U}T^*, \quad K = \frac{U}{U^*}K^*$$

- Scheduled Nomoto Model

$$\dot{r} = - \underbrace{\left(\frac{U}{U^*}\right) \frac{1}{T^*}}_{\frac{1}{T(U)}} r + \underbrace{\left(\frac{U}{U^*}\right)^2 \frac{K^*}{T^*}}_{\frac{K(U)}{T(U)}} \delta$$

Scheduled MOMOTO Model



State Equation

- Motion equation

$$\begin{cases} \dot{\psi} = r \\ \dot{r} = -\left(\frac{U}{U^*}\right) \frac{1}{T^*} r + \left(\frac{U}{U^*}\right)^2 \frac{K^*}{T^*} \delta \end{cases}$$

- Rudder Dynamics

$$\dot{\delta} = -\frac{1}{T_a} \delta + \frac{K_a}{T_a} u$$

- State Equation

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{r} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix}}_{\dot{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\left(\frac{U}{U^*}\right) \frac{1}{T^*} & \left(\frac{U}{U^*}\right)^2 \frac{K^*}{T^*} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_a} \end{bmatrix}}_{A(U, U^2)} \underbrace{\begin{bmatrix} \psi \\ r \\ \delta \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_a}{T_a} \end{bmatrix}}_B u$$

- Output Equation

$$\underbrace{\psi}_y = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} \psi \\ r \\ \delta \end{bmatrix}}_x$$

LPV Model with 3 Vertexes

$$\dot{x} = \underbrace{(p_1 A_1 + p_2 A_2 + p_3 A_3)}_{A(U, U^2)} x + Bu$$

where $A_1 = A(U_1, U_1^2)$, $A_2 = A(U_2, U_2^2)$

$A_3 = A(U_3, U_1 U_2)$ with $U_3 = \frac{U_1 + U_2}{2}$ and

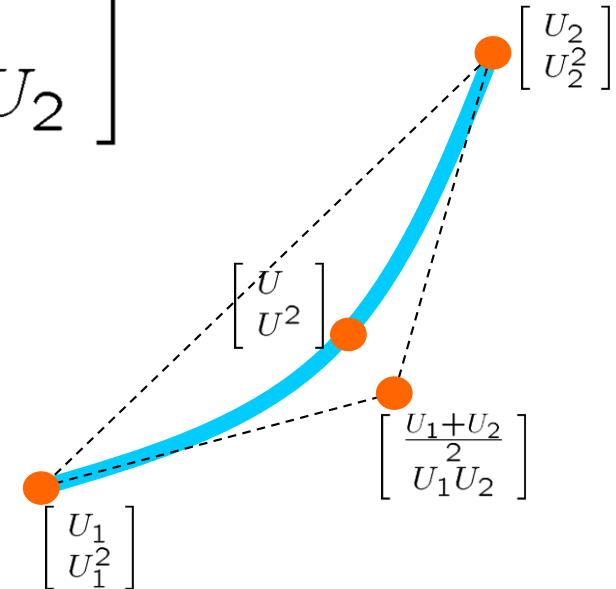
$$p_1 = \frac{1}{p_0} \det \begin{bmatrix} U - U_3 & U_2 - U_3 \\ U^2 - U_1 U_2 & U_2^2 - U_1 U_2 \end{bmatrix}$$

$$p_2 = \frac{1}{p_0} \det \begin{bmatrix} U_1 - U_3 & U - U_3 \\ U_1^2 - U_1 U_2 & U^2 - U_1 U_2 \end{bmatrix}$$

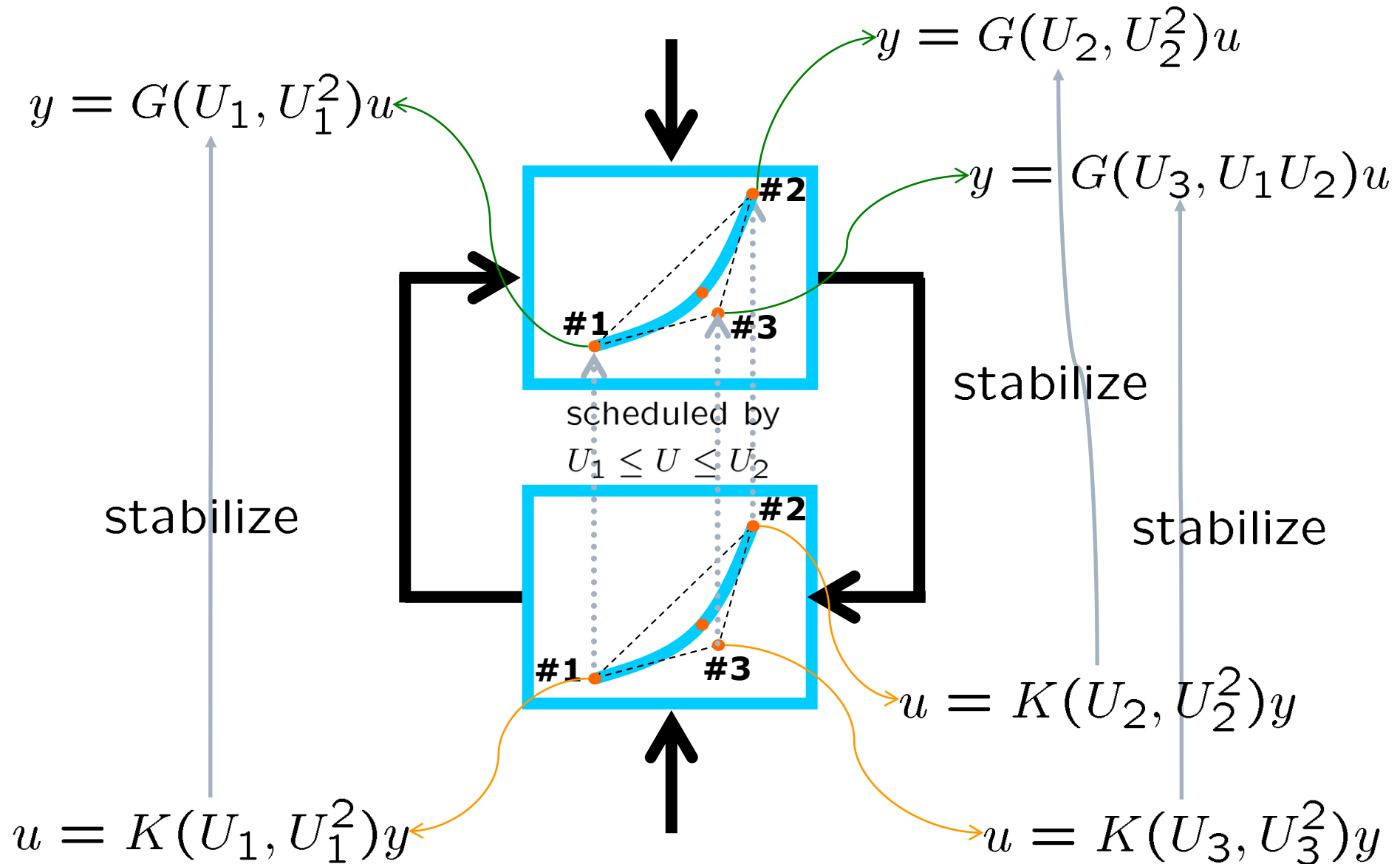
$$p_3 = \frac{1}{p_0} \det \begin{bmatrix} U_1 - U_2 & U_2 - U \\ U_1^2 - U_2^2 & U_2^2 - U^2 \end{bmatrix}$$

$$p_0 = \det \begin{bmatrix} U_1 - U_2 & U_2 - U_3 \\ U_1^2 - U_2^2 & U_2^2 - U_1 U_2 \end{bmatrix}$$

satisfying $p_1 + p_2 + p_3 = 1$

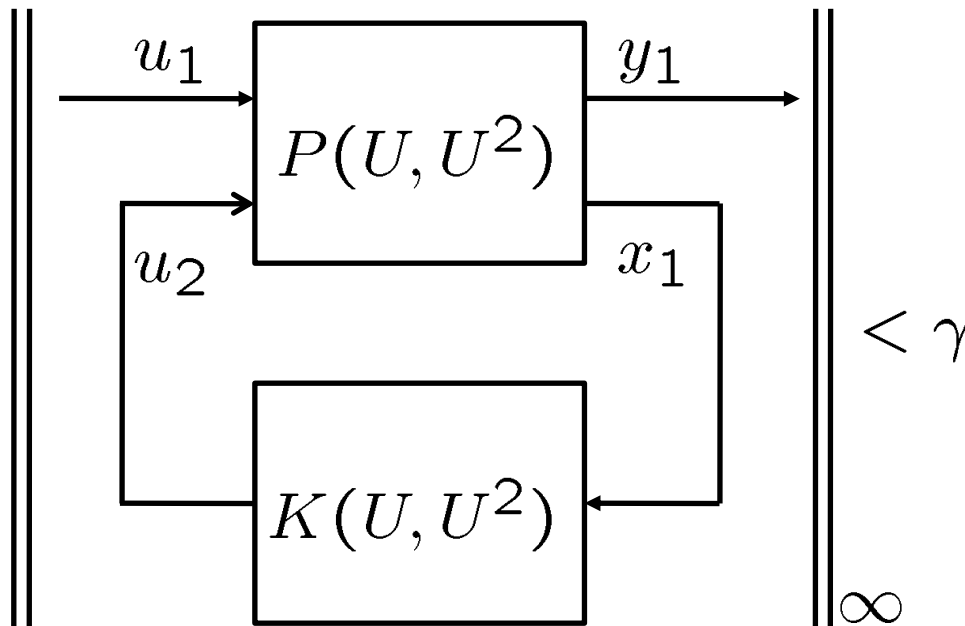


LPV Control System

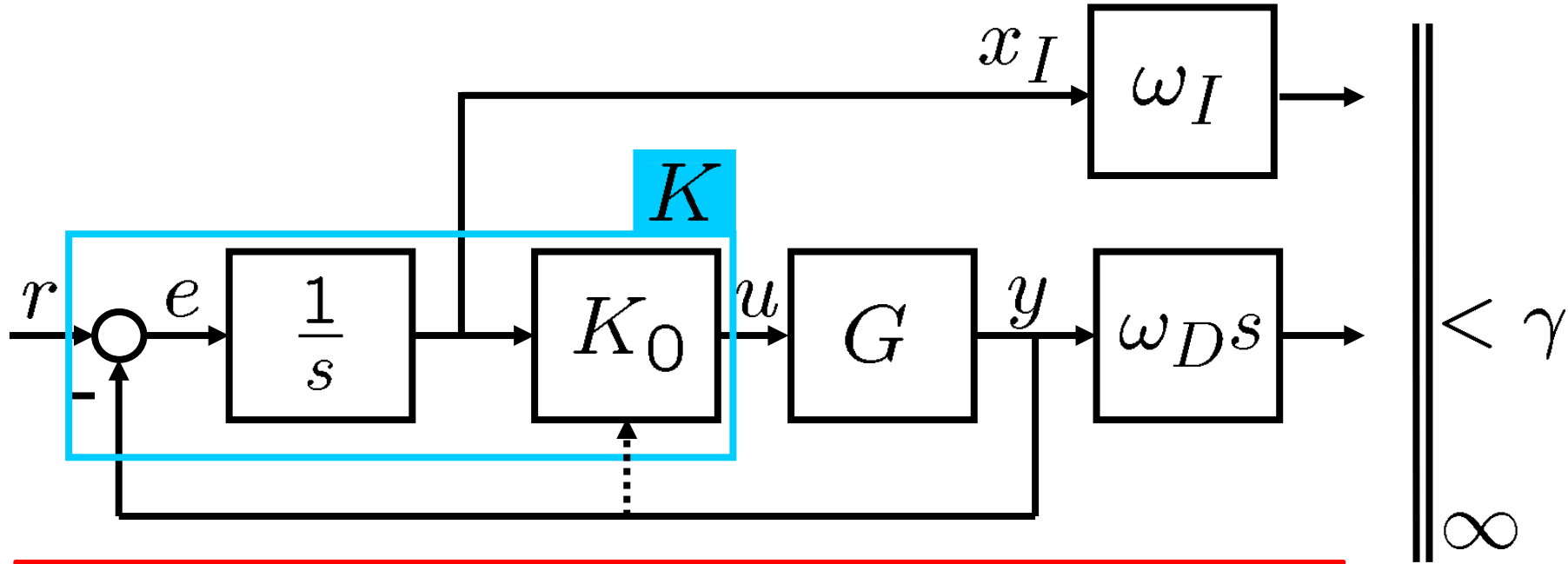


Design Specification

- Spec.#1:
The closed-loop system is internally stable.
- Spec.#2:
The L_2 -induced gain of the operator is bounded by γ .



Interconnection with Integrator



$$\frac{\omega_I x_I}{r} = \omega_I \frac{\frac{1}{s}}{1 + GK_0 \frac{1}{s}} = \underbrace{\frac{\omega_I}{s}}_{W_S} \underbrace{\frac{1}{1 + GK}}_S$$

$$\frac{\omega_D \dot{y}}{r} = \omega_D s \frac{GK_0 \frac{1}{s}}{1 + GK_0 \frac{1}{s}} = \underbrace{\omega_D s}_{W_T} \underbrace{\frac{GK}{1 + GK}}_T$$

CLPS by LPV OF

- 2-port representation

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_I \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A(U, U^2) & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}}_{A(U, U^2)} \begin{bmatrix} x \\ x_I \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_{B_1} r + \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_2} u \\ \begin{bmatrix} \omega_I x_I \\ \omega_D \dot{y} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \omega_I \\ \omega_D C A(U, U^2) & 0 \end{bmatrix}}_{C_1} \begin{bmatrix} x \\ x_I \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{D_{11}} r + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \omega_D C B \end{bmatrix}}_{D_{12}} u \\ \begin{bmatrix} y \\ x_I \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{C_2} \begin{bmatrix} x \\ x_I \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{D_{21}} r \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} A(U, U^2) &= p_1(U, U^2)A_1 + p_2(U, U^2)A_2 + p_3(U, U^2)A_3 \\ A_K(U, U^2) &= p_1(U, U^2)A_{K1} + p_2(U, U^2)A_{K2} + p_3(U, U^2)A_{K3} \\ B_K(U, U^2) &= p_1(U, U^2)B_{K1} + p_2(U, U^2)B_{K2} + p_3(U, U^2)B_{K3} \\ C_K(U, U^2) &= p_1(U, U^2)C_{K1} + p_2(U, U^2)C_{K2} + p_3(U, U^2)C_{K3} \\ D_K(U, U^2) &= p_1(U, U^2)D_{K1} + p_2(U, U^2)D_{K2} + p_3(U, U^2)D_{K3} \end{aligned}$$

- output feedback

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{x}_K \\ \dot{x}_I \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_K & B_{K2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A_K(U, U^2)} \begin{bmatrix} x_K \\ x_I \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} B_{K1} & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}}_{B_K(U, U^2)} \begin{bmatrix} y \\ r \end{bmatrix} \\ u = \underbrace{\begin{bmatrix} C_K & D_{K2} \end{bmatrix}}_{C_K(U, U^2)} \begin{bmatrix} x_K \\ x_I \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} D_{K1} & 0 \end{bmatrix}}_{D_K(U, U^2)} \begin{bmatrix} y \\ r \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

LMI Based Design of LPV OF

- Minimize γ
on $R = R^T, S = S^T, \mathcal{A}_{Ki}, \mathcal{B}_{Ki}, \mathcal{C}_{Ki}, D_{Ki}$ ($i = 1, 2, 3$)
subject to $\begin{bmatrix} R & I \\ I & S \end{bmatrix} > 0$ and
LMI-OF1,2,3,4 for vertex1
LMI-OF1,2,3,4 for vertex2
LMI-OF1,2,3,4 for vertex3
- Determine the output feedback controller
for each vertex A_{Ki}, B_{Ki}, C_{Ki} ($i = 1, 2, 3$)

$$A_{Ki} = N^{-1}(\mathcal{A}_{Ki} - S(A_i - B_2 D_{Ki} C_2)R - \mathcal{B}_{Ki} C_2 R - S B_2 C_{Ki})M^{-T}$$

$$B_{Ki} = N^{-1}(\mathcal{B}_{Ki} - S B_2 D_{Ki})$$

$$C_{Ki} = (C_{Ki} - D_{Ki} C_2 R)M^{-T}$$

$$\text{where } I - SR = NM^T$$

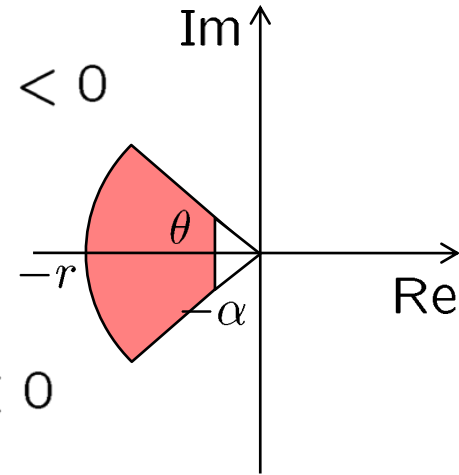
LMIs for OF Design

- **LMI-OF1:**

$$\begin{bmatrix} AR + B_2 C_K & A + B_2 D_K C_2 \\ \mathcal{A}_K & SA + \mathcal{B}_K C_2 \end{bmatrix} + (*)^T + \alpha \begin{bmatrix} R & I \\ I & S \end{bmatrix} < 0$$

- **LMI-OF2:**

$$\begin{bmatrix} -r \begin{bmatrix} R & I \\ I & S \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} AR + B_2 C_K & A + B_2 D_K C_2 \\ \mathcal{A}_K & SA + \mathcal{B}_K C_2 \end{bmatrix} \\ (*)^T & -r \begin{bmatrix} R & I \\ I & S \end{bmatrix} \end{bmatrix} < 0$$



- **LMI-OF3:**

$$\begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ -\cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} AR + B_2 C_K & A + B_2 D_K C_2 \\ \mathcal{A}_K & SA + \mathcal{B}_K C_2 \end{bmatrix} + (*)^T < 0$$

- **LMI-OF4:**

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} AR + B_2 C_K & A + B_2 D_K C_2 \\ \mathcal{A}_K & SA + \mathcal{B}_K C_2 \end{bmatrix} + (*)^T & \begin{bmatrix} B_1 + B_2 D_K D_{21} \\ SB_1 + \mathcal{B}_K D_{21} \end{bmatrix} & (*)^T \\ (*)^T & -\gamma^2 I & (*)^T \\ [C_1 R + D_{12} C_K & C_1 + D_{12} D_K C_2] & D_{11} & -I \end{bmatrix} < 0$$

Scheduled PID Controller

Consider a PID control presented by

$$\delta = K_P(\psi_c - \psi) - K_D r + K_I \int_0^t (\psi_c - \psi(\tau)) d\tau$$

Assuming $K_i = 0$ and defining $\omega_n = \sqrt{\frac{KK_p}{T}}$, $\zeta = \frac{1+KK_d}{2\sqrt{KK_pT}}$, the following relation should hold.

$$\underbrace{\frac{1}{T}}_{\text{ship motion}} < \underbrace{\omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2 + \sqrt{4\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2}}}_{\text{controlled motion}} < \underbrace{\frac{1}{T_\delta}}_{\text{steering motion}}$$

Thus the PID gains are calculated as

$$K_P = \frac{T\omega_n^2}{K}, \quad K_D = \frac{2T\zeta\omega_n - 1}{K}, \quad K_I = \frac{\omega_n}{10}K_p$$

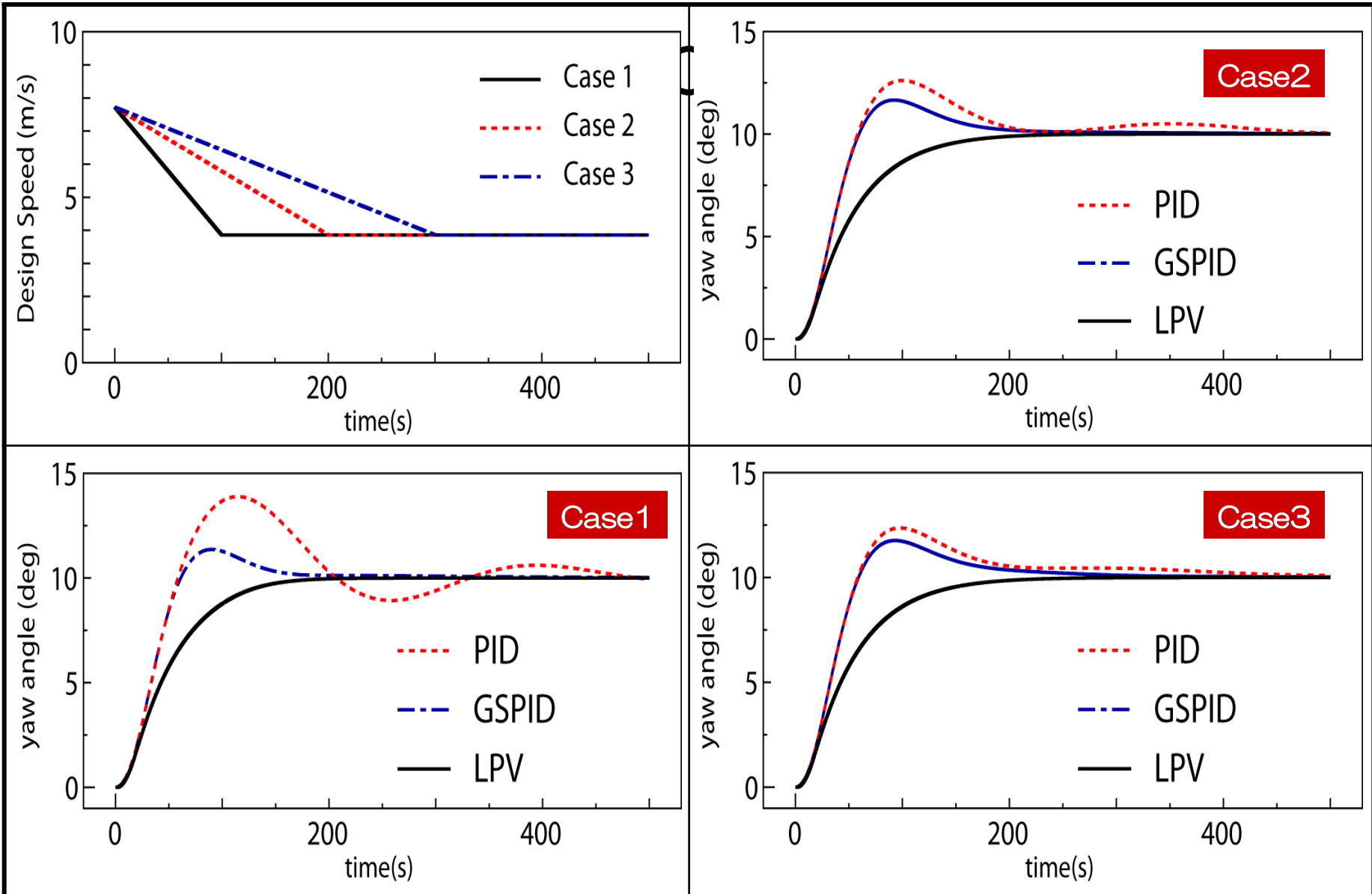
Scheduled PID controller is implemented as

$$K_P(U) = \left(\frac{U^*}{U}\right)^2 \frac{T^*}{K^*} \omega_n^2$$

$$K_D(U) = \left(\frac{U^*}{U}\right)^2 \frac{T^*}{K^*} 2\zeta\omega_n - \left(\frac{U^*}{U}\right) \frac{1}{K^*}$$

$$K_I(U) = \left(\frac{U^*}{U}\right)^2 \frac{T^*}{K^*} \frac{\omega_n^3}{10}$$

LPV Control of MONOTO Model



Outline

1 LQI Control

Linear-Quadratic-Integral Design of Linear-Time-Invariant Control

2 LPV Control

Linear-Matrix-Inequality Based Design of Linear-Parameter-Varying Control

Applications

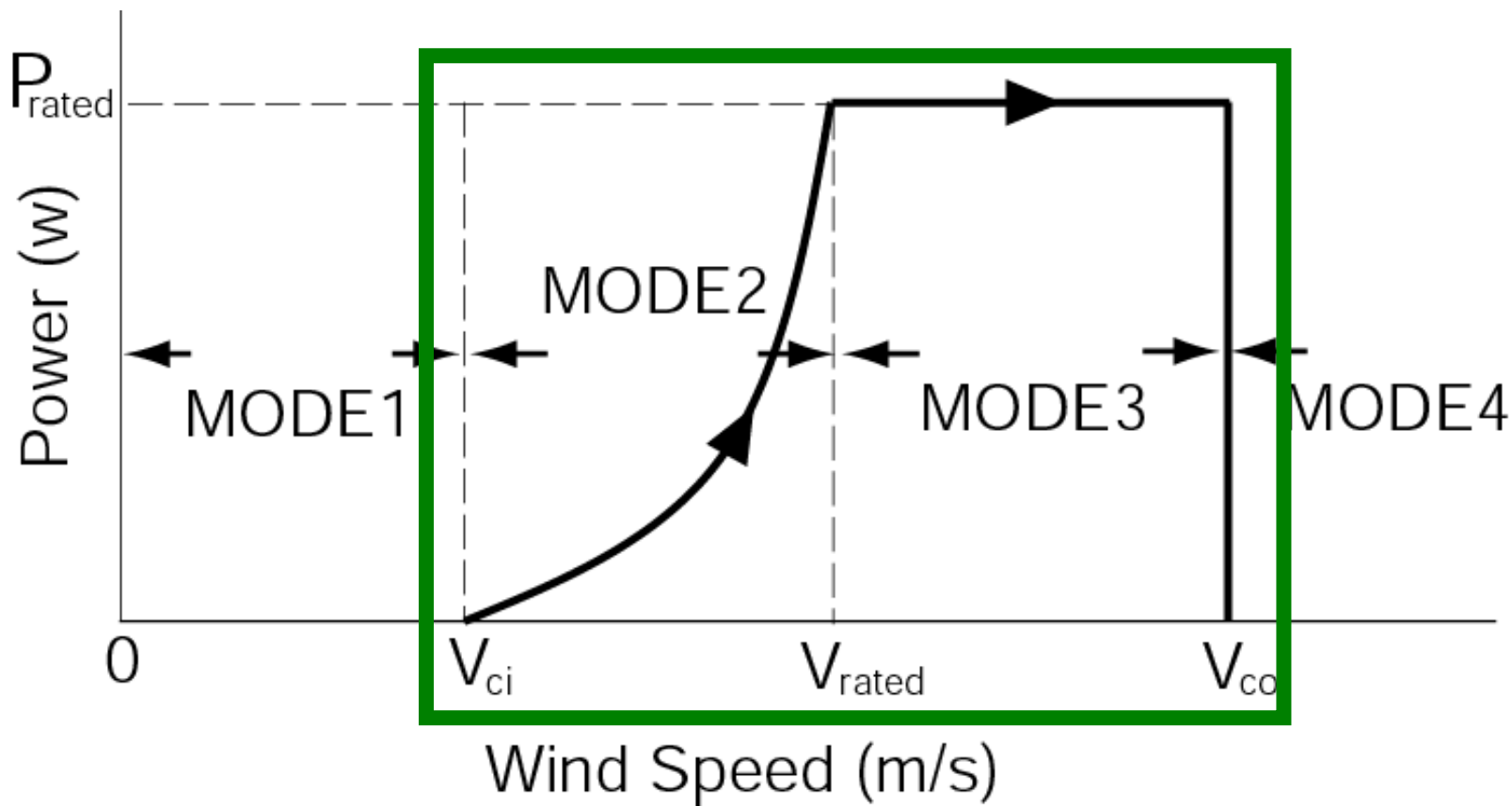
3 Underwater Vehicle

4 Flexible Riser

5 Azimuth thrusters

6 Nomoto's Model

7 Wind Turbine

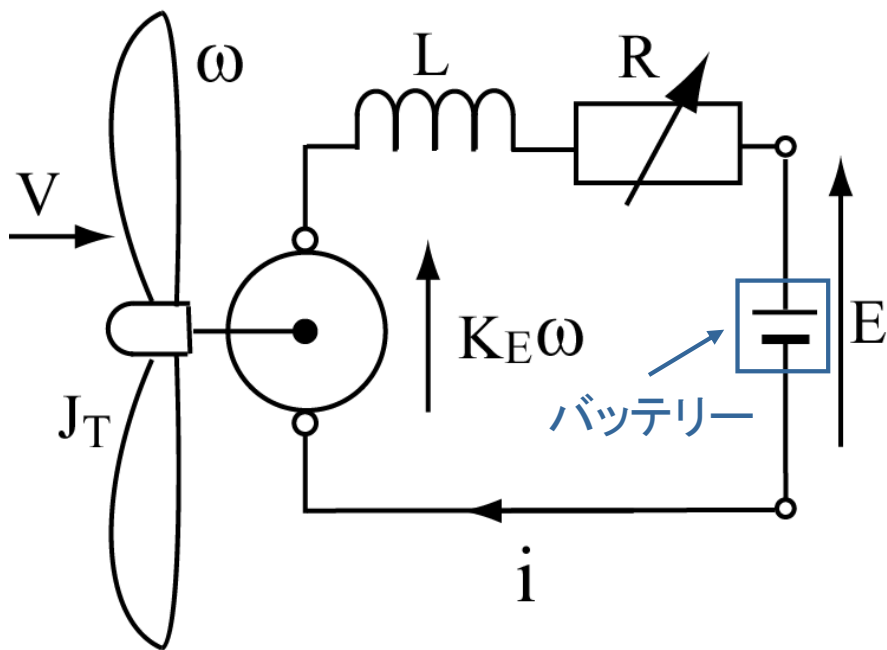


V_{ci} : カットイン風速

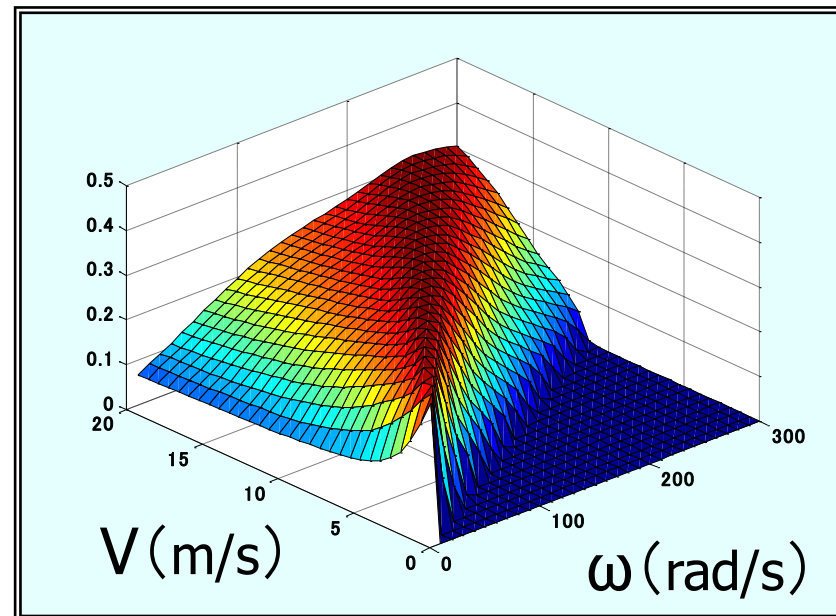
V_{rated} : 定格風速

V_{co} : カットアウト風速

P_{rated} : 定格出力



風力発電機モデル



風レンズ風車の空カトルク特性

風レンズ風車の数学モデル

$$\begin{cases} J_T \dot{\omega} = \frac{1}{2} \rho A r C_T(\lambda) V^2 - K_T i \\ L \dot{i} + R i + E = K_E \omega \end{cases} \quad \left(\lambda = \frac{r \omega}{V} \right)$$

可変負荷により任意電流値が実現可能

38] 風力発電機のLPVモデル

$$J_T \dot{\omega} = \boxed{\frac{1}{2} \rho \pi r^3 C_T(\lambda) V^2} - K_T i \quad \left(\lambda = \frac{r\omega}{V} \right)$$

$$Q \approx Q^* + \alpha(\omega - \omega^*) + \beta(V - V^*)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\partial Q}{\partial \omega} = \frac{1}{2} \rho r^2 A V \frac{\partial C_T}{\partial \lambda} \\ \beta = \frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{1}{2} \rho r A V \left(2C_T - \lambda \frac{\partial C_T}{\partial \lambda} \right) \end{cases}$$



$$\frac{d}{dt}(\omega - \omega^*) = \underbrace{\frac{1}{2J_T} \rho r^2 A V \frac{\partial C_T}{\partial \lambda}}_{A(V)} (\omega - \omega^*) - \underbrace{\frac{K_T}{J_T}}_B (i - i^*)$$

モード2の制御目的

風力エネルギーを最大限、獲得すること

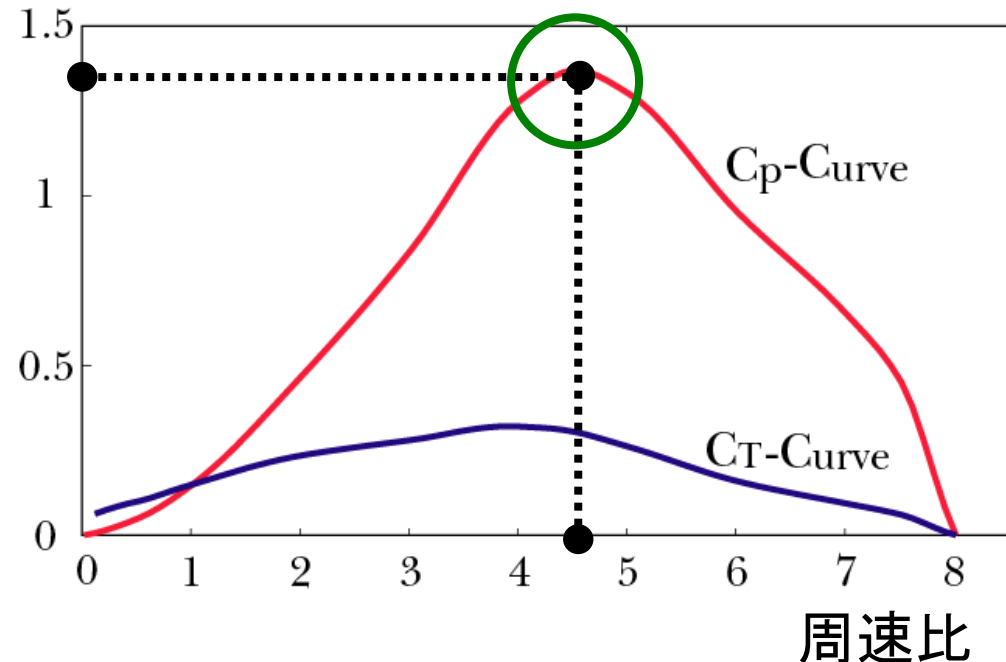


風レンズの周速比が常に**最適周速比**となるように回転数制御

出力係数、トルク係数

制御目的:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left[\omega - \frac{V}{r} \lambda_{opt} \right] = 0$$



モード2のLPVモデル

$$\frac{d}{dt}(\omega - \omega^*) = \underbrace{\frac{1}{2J_T} \rho r^2 AV \frac{\partial C_T}{\partial \lambda}}_{A(V)} (\omega - \omega^*) - \underbrace{\frac{K_T}{J_T}}_B (i - i^*)$$

モード2における風速の変動幅は

$$V_{ci} \leq V \leq V_{rated}$$

次の **ポリトピック型LPVモデル** を導出することができる

$$\frac{1}{2J_T} \rho r^2 AV \frac{\partial C_T}{\partial \lambda} = p_1 \left(\frac{1}{2J_T} \rho r^2 AV_{ci} \frac{\partial C_T}{\partial \lambda} \right) + p_2 \left(\frac{1}{2J_T} \rho r^2 AV_{rated} \frac{\partial C_T}{\partial \lambda} \right)$$

ただし、

$$p_1 = \frac{V_{rated} - V}{V_{rated} - V_{ci}}, \quad p_2 = \frac{V - V_{ci}}{V_{rated} - V_{ci}} \quad (p_1 + p_2 = 1)$$

モード3の制御目的

風エネルギーから獲得したパワーを定格出力に抑える



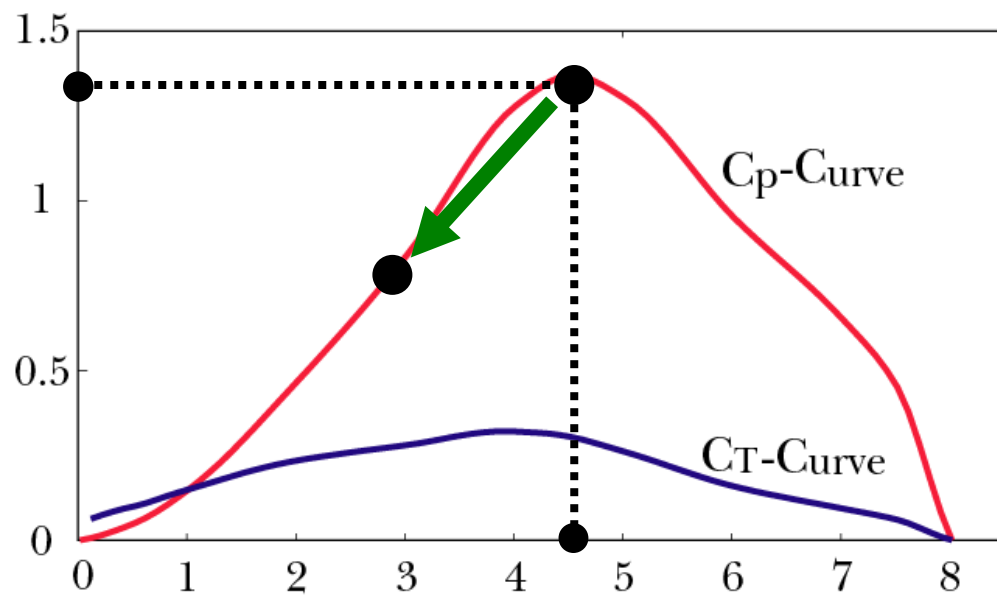
$$P_{rated} = \frac{1}{2} \rho A C_P(\lambda) V^3$$

$$\lambda(V) = C_P^{-1} \left(\frac{2P_{rated}}{\rho A V^3} \right)$$

制御目的:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left[\omega - \frac{V}{r} C_P^{-1} \left(\frac{2P_{rated}}{\rho A V^3} \right) \right] = 0$$

出力係数、トルク係数



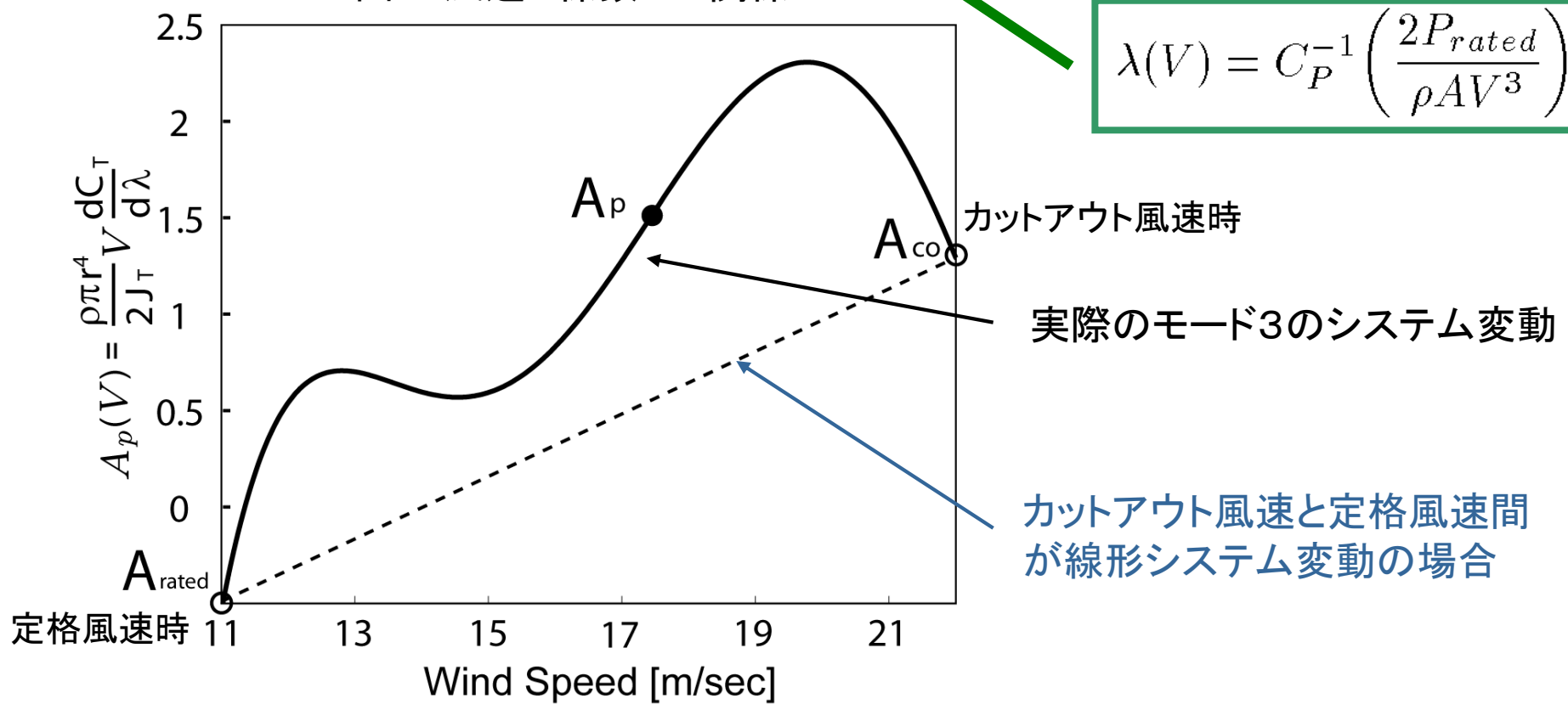
周速比

モード3のLPVモデル

$$\frac{d}{dt}(\omega - \omega^*) = \frac{1}{2J_T} \rho r^2 AV \frac{\partial C_T}{\partial \lambda} (\omega - \omega^*) - \frac{K_T}{J_T} (i - i^*)$$

図6. 風速と係数Aの関係

$$\lambda(V) = C_P^{-1} \left(\frac{2P_{rated}}{\rho AV^3} \right)$$



ポリトピック型LPVモデルを導出することができない

モード3のLPVモデル

LPVモデリング問題を解決する1つのアプローチ
トルク係数曲線を2次関数近似

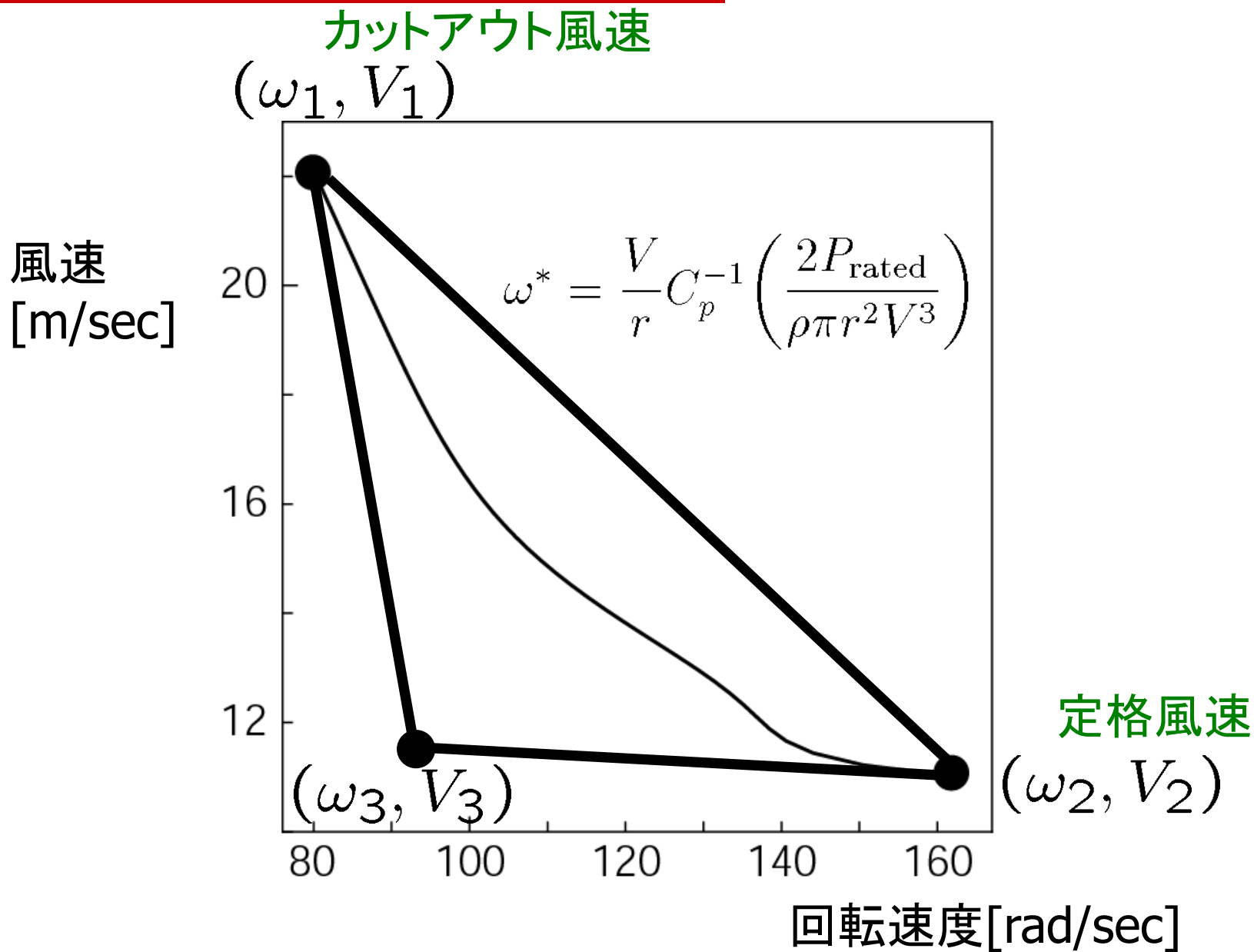
$$C_T(\lambda) \simeq c_2 \lambda^2 + c_1 \lambda + c_0$$



風速と回転数の2つのパラメータに線形依存した
風力発電機の状態方程式が導出される

$$\frac{d}{dt}(\omega - \omega^*) = \left(\rho \pi r^5 c_2 \omega + \frac{1}{2} \rho \pi r^4 c_1 V \right) (\omega - \omega^*) - \frac{K_T}{J_T} (i - i^*)$$

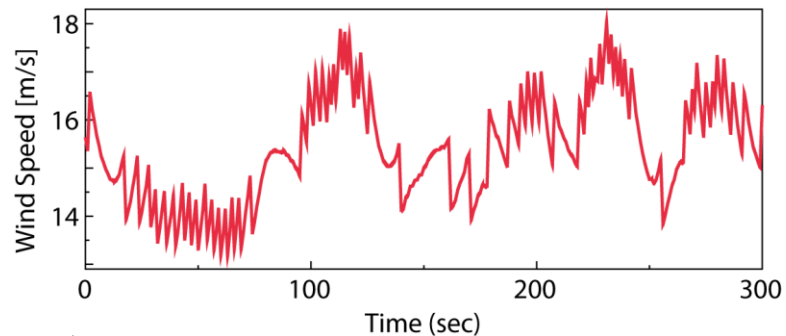
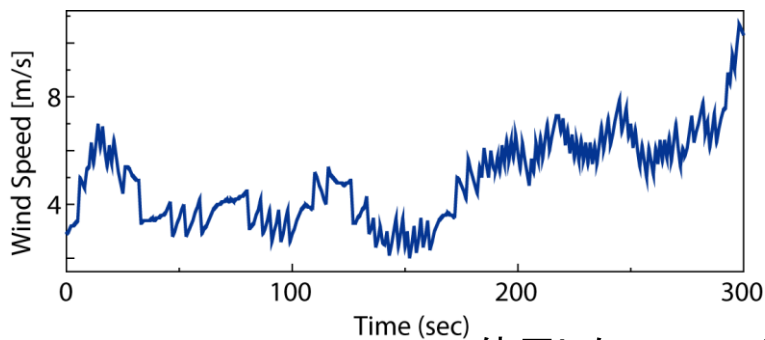
モード3のLPVモデル



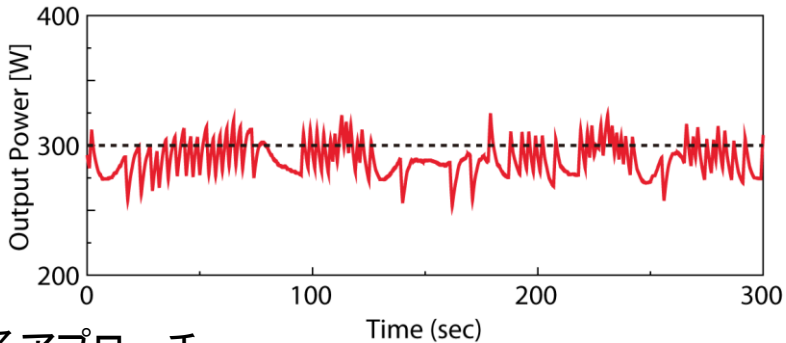
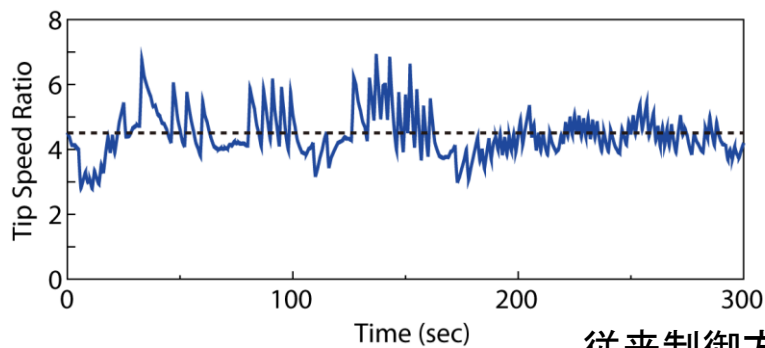
5) 数値シミュレーションによる検討

モード2の計算結果

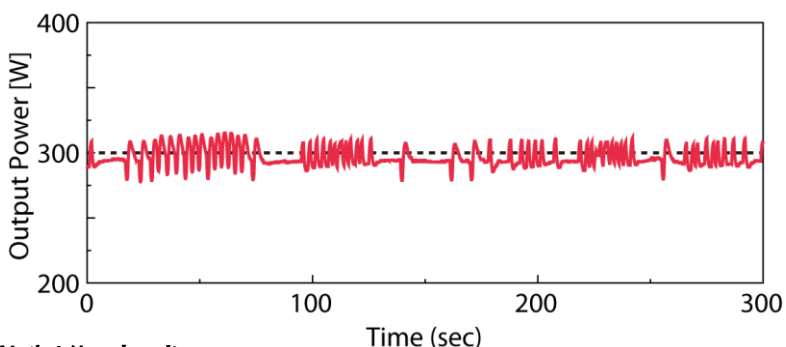
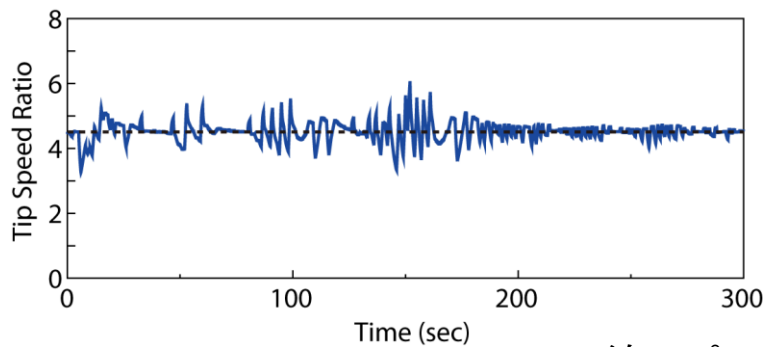
モード3の計算結果



使用したフィールド計測風速データの時系列



従来制御方式によるアプローチ



線形パラメータ変動制御方式

Summary (1)

- Under-Actuated Systems ($m < p$)
 - How to choose controlled variables based on measured variables (p), as many as manipulated variables (m)
(if you chase after two rabbits, you won't catch either)
- Inverted pendulum ($m=1$)
 - *The center of impact* can be chosen as a controlled variable. *(sampling from both worlds)*
 - Based on this selection, a *velocity-input model* of IP can be obtained.
 - This model can give a position/velocity command to the position/velocity-controlled actuator (by an integration).

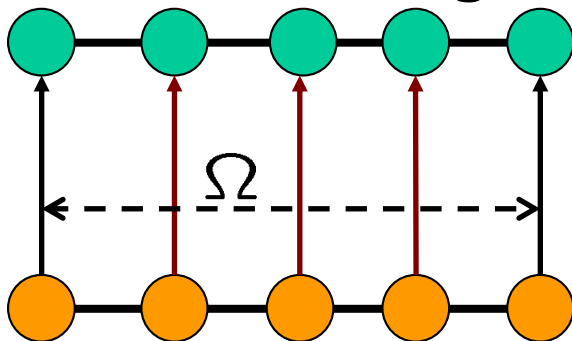
Summary (2)

■ Gain-Scheduling Control

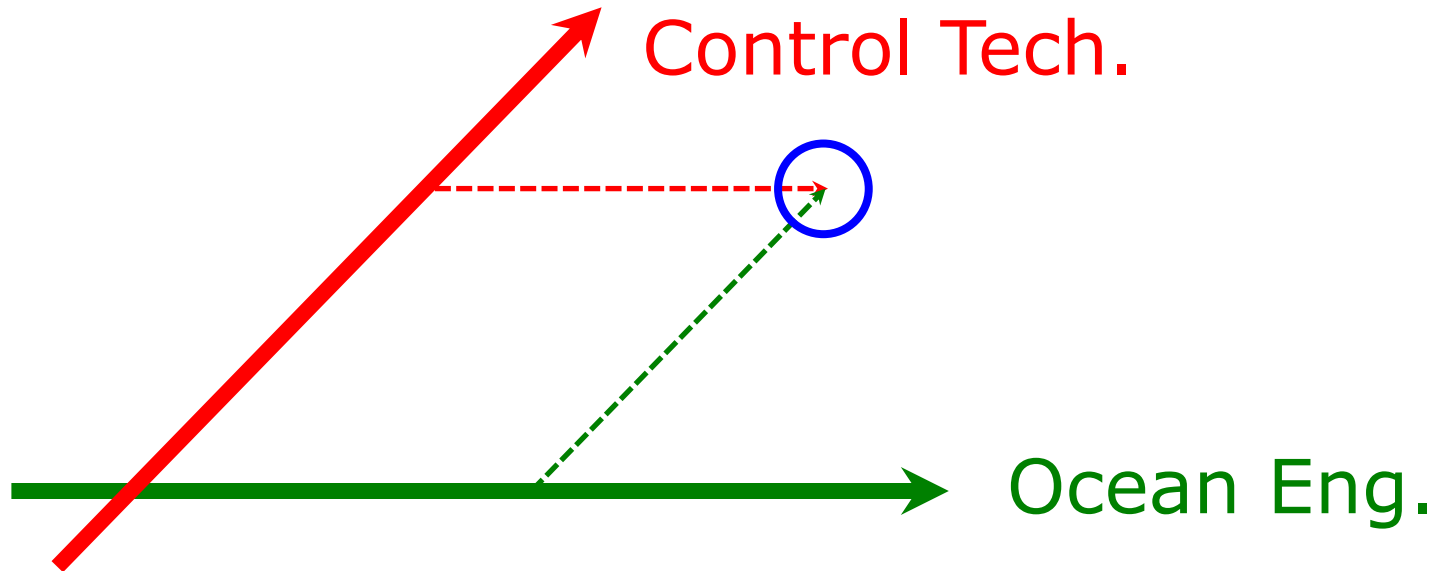
- Parameter variation (to be measured)
- The interpolation of vertex controllers doesn't guarantee the closed-loop stability in time-varying system

■ LPV Control

- How to get LPV model with varying parameter Ω
- How to design LPV control based on LMIs



Concluding Remark



Having control technologies as the second axis will expand your engineering ability.

Thank you for your attention.