

最終講義： システム制御の理論と応用 4 2 年

早川義一

名古屋大学 大学院工学研究科

2016.3.15

- 1 はじめに
- 2 研究雑感 (初期の研究をふりかえって)
 - 線形システムの構造可制御
 - サンプル値系の極限零点と H_∞ 制御
 - 巨大吊り橋主塔の制振制御
- 3 おわりに

- 1 はじめに
- 2 研究雑感 (初期の研究をふりかえって)
 - 線形システムの構造可制御
 - サンプル値系の極限零点と H_∞ 制御
 - 巨大吊り橋主塔の制振制御
- 3 おわりに

- ① 生まれたときは Occupied Japan
- ② 高度経済成長 (1954-1973) と"夢の科学技術 (トランジスタ, 原子力, …)"
- ③ ベトナム戦争 (1960?-1975) と学生運動

① 生まれたときは Occupied Japan

朝鮮戦争 (1950.6–1953.7 休戦)

サンフランシスコ講和条約 (調印 : 1951.9, 発行:1952.4)



生まれた翌日 (1951.7.11) の朝刊

① 生まれたときは Occupied Japan

朝鮮戦争 (1950.6–1953.7 休戦)

サンフランシスコ講和条約 (調印 : 1951.9, 発行:1952.4)



生まれた翌日 (1951.7.11) の朝刊



主権回復!! まだ選挙権はありませんが...

① 生まれたときは Occupied Japan

朝鮮戦争 (1950.6–1953.7 休戦)

サンフランシスコ講和条約 (調印 : 1951.9, 発行:1952.4)

② 高度経済成長 (1954-1973) と"夢の科学技術 (トランジスタ, 原子力, …)"

③ ベトナム戦争 (1960?–1975) と学生運動

② 高度経済成長 (1954-1973) と"夢の科学技術 (トランジスタ, 原子力, …)"

"電子立国日本": トランジスタ家電、電卓など
(真空管からトランジスタ、大規模集積回路へ)

- 初の有人宇宙飛行 (1961.4), アポロ 11 号月面着陸 (1969.7)
- テレビ放送開始 (1953.2, カラ - は 1960.9)
- 黒四ダム (1963.8), 富士山レーダー (1965.3) ← 伊勢湾台風 (1959.9)
- 日本初の原子力発電実施 (1963.10)
- 東京オリンピック (1964.10), 大阪万博 (1970.3)



<http://gendai.ismedia.jp/articles/-/31802>



<https://www.nasa.gov/apollo11-gallery?id=379142>

② 高度経済成長 (1954-1973) と"夢の科学技術 (トランジスタ, 原子力, …)"

"電子立国日本": トランジスタ家電、電卓など
(真空管からトランジスタ、大規模集積回路へ)

- 初の有人宇宙飛行 (1961.4), アポロ 11 号月面着陸 (1969.7)
- テレビ放送開始 (1953.2, カラ - は 1960.9)
- 黒四ダム (1963.8), 富士山レーダー (1965.3) ← 伊勢湾台風 (1959.9)
- 日本初の原子力発電実施 (1963.10)
- 東京オリンピック (1964.10), 大阪万博 (1970.3)



<http://gendai.ismedia.jp/articles/-/31802>



芥川龍之介の"桃太郎"はまだ読んでいない

① 生まれたときは Occupied Japan

朝鮮戦争 (1950.6–1953.7 休戦)

サンフランシスコ講和条約 (調印 : 1951.9, 発行:1952.4)

② 高度経済成長 (1954-1973) と"夢の科学技術 (トランジスタ, 原子力, …)"

"電子立国日本" : トランジスタ家電、電卓など
(真空管からトランジスタ、大規模集積回路へ)

- 初の有人宇宙飛行 (1961.4), アポロ 11 号月面着陸 (1969.7)
- テレビ放送開始 (1953.2, カラ - は 1960.9)
- 黒四ダム (1963.8), 富士山レーダー (1965.3) ← 伊勢湾台風 (1959.9)
- 日本初の原子力発電実施 (1963.10)
- 東京オリンピック (1964.10), 大阪万博 (1970.3)

③ ベトナム戦争 (1960?-1975) と学生運動

③ ベトナム戦争 (1960?–1975) と学生運動

- キューバ危機とケネディ暗殺 (1963.11)。公民権運動とキング牧師暗殺 (1968.4)。
- 中国文化大革命 (1966～)。フランス 5 月革命 (1968.5)。ソ連軍チェコ進入 (1968.8)。
- 東大安田講堂事件 (1969.1)・東大入試中止 (1969.3)。名大教養部紛争 (1969.4-12)。
- 高校受験:9 教科 9 科目。高校 (全人教育):理科 4 科目, 社会 4 科目, 美術, 音楽, 書道。
- 高校生の街頭デモ: 1038 人 (1969.11) ← 県教委「管理教育」

③ ベトナム戦争 (1960?–1975) と学生運動

- キューバ危機とケネディ暗殺 (1963.11)。公民権運動とキング牧師暗殺 (1968.4)。
- 中国文化大革命 (1966～)。フランス 5 月革命 (1968.5)。ソ連軍チェコ進入 (1968.8)。
- 東大安田講堂事件 (1969.1)・東大入試中止 (1969.3)。名大教養部紛争 (1969.4-12)。
- 高校受験:9 教科 9 科目。高校 (全人教育):理科 4 科目, 社会 4 科目, 美術, 音楽, 書道。
- 高校生の街頭デモ: 1038 人 (1969.11) ← 県教委「管理教育」



当日 (1969.11.22) の夕刊

③ ベトナム戦争 (1960?-1975) と学生運動

- キューバ危機とケネディ暗殺 (1963.11)。公民権運動とキング牧師暗殺 (1968.4)。
- 中国文化大革命 (1966~)。フランス 5 月革命 (1968.5)。ソ連軍チェコ進入 (1968.8)。
- 東大安田講堂事件 (1969.1)・東大入試中止 (1969.3)。名大教養部紛争 (1969.4-12)。
- 高校受験:9 教科 9 科目。高校 (全人教育):理科 4 科目, 社会 4 科目, 美術, 音楽, 書道。
- 高校生の街頭デモ: 1038 人 (1969.11) ← 県教委「管理教育」



当日 (1969.11.22) の夕刊

全人教育の成果?



連日の生徒集会で授業日数が不足
→ 補講です (春休み?)

① 生まれたときは Occupied Japan

朝鮮戦争 (1950.6–1953.7 休戦)

サンフランシスコ講和条約 (調印：1951.9, 発行:1952.4)

② 高度経済成長 (1954-1973) と"夢の科学技術 (トランジスタ, 原子力, …)"

"電子立国日本": トランジスタ家電、電卓など
(真空管からトランジスタ、大規模集積回路へ)

- 初の有人宇宙飛行 (1961.4), アポロ 11 号月面着陸 (1969.7)
- テレビ放送開始 (1953.2, カラーは 1960.9)
- 黒四ダム (1963.8), 富士山レーダー (1965.3) ← 伊勢湾台風 (1959.9)
- 日本初の原子力発電実施 (1963.10)
- 東京オリンピック (1964.10), 大阪万博 (1970.3)

③ ベトナム戦争 (1960?–1975) と学生運動

- キューバ危機とケネディ暗殺 (1963.11)。公民権運動とキング牧師暗殺 (1968.4)。
- 中国文化大革命 (1966~)。フランス 5 月革命 (1968.5)。ソ連軍チェコ進入 (1968.8)。
- 東大安田講堂事件 (1969.1)・東大入試中止 (1969.3)。名大教養部紛争 (1969.4-12)。
- 高校受験:9 教科 9 科目。高校 (全人教育):理科 4 科目, 社会 4 科目, 美術, 音楽, 書道。
- 高校生の街頭デモ: 1038 人 (1969.11) ← 県教委「管理教育」

- 大学紛争は概ね沈静化 (ところどころに、アジ演説、ヘルメット姿) ← 消化不良?
- 専門講義：実験データと経験則のかたまり ← アカデミック?
工場実習 (3年生の夏休み)：関東の会社・タービン工場 ← 油まみれ
- 情報工学専攻設置 (1973.4) → "自動制御研究施設"を知る (1973.1 ころ)
- 卒研は大橋研究室 (材料力学講座) 1973.4–1974.3
 - 研究指導：大橋教授、戸伏さん (当時ドクターの学生, 現在 愛工大教授)
 - 卒業論文：直線に折れ曲がる直線応力経路に沿う軟化セルロイドの変形解析
非線形粘弾性理論の構成式をつくるための基礎的な実験研究
イリュージョンの主擬線形粘弾性理論、主三次粘弾性理論、ひずみ増分理論、偏差応力テンソル、…

- 大学紛争は概ね沈静化 (ところどころに、アジ演説、ヘルメット姿) ← 消化不良?
- 専門講義：実験データと経験則のかたまり ← アカデミック?
工場実習 (3年生の夏休み)：関東の会社・タービン工場 ← 油まみれ
- 情報工学専攻設置 (1973.4) → "自動制御研究施設"を知る (1973.1 ころ)
- 卒研は大橋研究室 (材料力学講座) 1973.4–1974.3
 - 研究指導：大橋教授、戸伏さん (当時ドクターの学生, 現在 愛工大教授)
 - 卒業論文：直線に折れ曲がる直線応力経路に沿う軟化セルロイドの変形解析
非線形粘弾性理論の構成式をつくるための基礎的な実験研究
イリュージョンの主擬線形粘弾性理論、主三次粘弾性理論、ひずみ増分理論、偏差応力テンソル、…

- 大学紛争は概ね沈静化 (ところどころに、アジ演説、ヘルメット姿) ← 消化不良?
- 専門講義：実験データと経験則のかたまり ← アカデミック?
工場実習 (3年生の夏休み)：関東の会社・タービン工場 ← 油まみれ
- 情報工学専攻設置 (1973.4) → "自動制御研究施設"を知る (1973.1 ころ)
- 卒研は大橋研究室 (材料力学講座) 1973.4-1974.3
 - 研究指導：大橋教授、戸伏さん (当時ドクターの学生, 現在 愛工大教授)
 - 卒業論文：直線に折れ曲がる直線応力経路に沿う軟化セルロイドの変形解析
非線形粘弾性理論の構成式をつくるための基礎的な実験研究
イリュージョンの主擬線形粘弾性理論、主三次粘弾性理論、ひずみ増分理論、偏差応力テンソル、...



戸伏さんと



3号館中央地階の実験室

- 卒研は大橋研究室 (材料力学講座) 1973.4-1974.3



情報工学専攻 2 期生として自動制御研究施設・伊藤研究室に所属

① 修士課程 (1974.4–1976.3)

② 博士課程 (1976.4–1979.3)

情報工学専攻 2 期生として自動制御研究施設・伊藤研究室に所属

① 修士課程 (1974.4–1976.3)

- 伊藤教授は Brockett 教授 (Harvard Univ.) のところへ (1974.9-1975.7?)
- 初めての学会口頭発表 (計測自動制御学会学術講演会 1975.11 東京)
- **修士論文：可変速度式予見制御系について**
 - Sarachik and Ragazzini: A two-dimensional feedback control system (Trans. AIEE, 1957)
 - 早勢, 市川: 目標値の未来値を最適に利用する追値制御 (SICE 論文集, 1969)
← 後の「モデル予測制御」の先駆的な論文

早勢実先生
(航空教室 制御講座
→ 東京農工大)

情報工学専攻 2 期生として自動制御研究施設・伊藤研究室に所属

① 修士課程 (1974.4-1976.3)

- 伊藤教授は Brockett 教授 (Harvard Univ.) のところへ (1974.9-1975.7?)
- 初めての学会口頭発表 (計測自動制御学会学術講演会 1975.11 東京)
- **修士論文：可変速度式予見制御系について**
 - Sarachik and Ragazzini: A two-dimensional feedback control system (Trans. AIEE, 1957)
 - 早勢, 市川: 目標値の未来値を最適に利用する追値制御 (SICE 論文集, 1969)
← 後の「モデル予測制御」の先駆的な論文



早勢実先生
(航空教室 制御講座
→ 東京農工大)

情報工学専攻 2 期生として自動制御研究施設・伊藤研究室に所属

② 博士課程 (1976.4-1979.3)

- 微分幾何学的アプローチによる非線形系の可制御性に関する研究
- 解説記事 (伊藤教授と共著, 1977.12)



非線形システムの可制御性

—微分幾何学的接近—

伊藤正美*・早川義一*

計測と制御 (1977.12) (主な参考文献)

R.W.Brockett: System Theory on Group Manifolds and Coset Spaces, *SIAM J. Control*(1972)R.W.Brockett: Nonlinear Systems and Defferential Geometry, *Proc. IEEE* (1976)W.L.Chow: Über Systeme von Linearen Partiellen Differential-gleichungen Erster Ordnung, *Math. Ann.* (1939)H.J.Sussmann and V.Jurdjevic: Controllability of Nonlinear Systems, *J. Diff. Eq.* (1972)H.J.Sussmann and V.Jurdjevic: Control System on Lie Groups, *J. Diff. Eq.* (1972)R.Herschorn: Topological Semigroups, Sets of Generators, and Controllability, *Duke Math. J.* (1973)R.Herschorn: Controllability in Nonlinear Systems, *J. Diff. Eq.* (1975)

- 微分多様体、Frobenius の定理と Chow の定理
- 非線形システム $\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i$ の可到達領域 $\mathcal{R}(x_0, t)$ に関する研究成果

$$f(\cdot) = 0 \Rightarrow \mathcal{R}(x_0, t) = \mathcal{R}(x_0) = \{\exp B\}_G x_0 \quad \text{with } B := \{g_1, g_2, \dots, g_m\}_{LA}$$

$$f(\cdot) \neq 0 \Rightarrow \mathcal{R}(x_0, t) = (\exp tf)\{\exp \mathcal{I}\}_G x_0$$

where \mathcal{I} is the ideal generated by B in $\mathcal{L} := \{f, g_1, g_2, \dots, g_m\}_{LA}$

"dim span $\left\{ \text{ad}_f^i g_j : 1 \leq j \leq m, 0 \leq i \leq n-1 \right\}_{x_0} = n$ " \Rightarrow "locally reachable around x_0 "

非線形システムの可制御性

—微分幾何学的接近—

伊藤正美*・早川義一*

計測と制御 (1977.12) (主な参考文献)

- R.W.Brockett: System Theory on Group Manifolds and Coset Spaces, **SIAM J. Control**(1972)
 R.W.Brockett: Nonlinear Systems and Defferential Geometry, **Proc. IEEE** (1976)
 W.L.Chow: Über Systeme von Linearen Partiellen Differential-gleichungen Erster Ordnung, **Math. Ann.** (1939)
 H.J.Sussmann and V.Jurdjevic: Controllability of Nonlinear Systems, **J. Diff. Eq.** (1972)
 H.J.Sussmann and V.Jurdjevic: Control System on Lie Groups, **J. Diff. Eq.** (1972)
 R.Herschorn: Topological Semigroups, Sets of Generators, and Controllability, **Duke Math. J.** (1973)
 R.Herschorn: Controllability in Nonlinear Systems, **J. Diff. Eq.** (1975)

- 微分多様体、Frobenius の定理と Chow の定理
- 非線形システム $\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i$ の 可到達領域 $\mathcal{R}(x_0, t)$ に関する研究成果

$$f(\cdot) = 0 \Rightarrow \mathcal{R}(x_0, t) = \mathcal{R}(x_0) = \{exp \mathcal{B}\}_G x_0 \quad \text{with } \mathcal{B} := \{g_1, g_2, \dots, g_m\}_{LA}$$

$$f(\cdot) \neq 0 \Rightarrow \mathcal{R}(x_0, t) = (exp tf)\{exp \mathcal{I}\}_G x_0$$

where \mathcal{I} is the ideal generated by \mathcal{B} in $\mathcal{L} := \{f, g_1, g_2, \dots, g_m\}_{LA}$

"dim span $\left\{ ad_f^i g_j : 1 \leq j \leq m, 0 \leq i \leq n-1 \right\}_{x_0} = n$ " \Rightarrow "locally reachable around x_0 "

非線形システムの可制御性

—微分幾何学的接近—

伊藤正美*・早川義一*

計測と制御 (1977.12) (主な参考文献)

- R.W.Brockett: System Theory on Group Manifolds and Coset Spaces, **SIAM J. Control**(1972)
 R.W.Brockett: Nonlinear Systems and Defferential Geometry, **Proc. IEEE** (1976)
 W.L.Chow: Über Systeme von Linearen Partiellen Differential-gleichungen Erster Ordnung, **Math. Ann.** (1939)
 H.J.Sussmann and V.Jurdjevic: Controllability of Nonlinear Systems, **J. Diff. Eq.** (1972)
 H.J.Sussmann and V.Jurdjevic: Control System on Lie Groups, **J. Diff. Eq.** (1972)
 R.Herschorn: Topological Semigroups, Sets of Generators, and Controllability, **Duke Math. J.** (1973)
 R.Herschorn: Controllability in Nonlinear Systems, **J. Diff. Eq.** (1975)

- 微分多様体、Frobenius の定理と Chow の定理
- 非線形システム $\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i$ の 可到達領域 $\mathcal{R}(x_0, t)$ に関する研究成果

$$f(\cdot) = 0 \Rightarrow \mathcal{R}(x_0, t) = \mathcal{R}(x_0) = \{exp \mathcal{B}\}_G x_0 \quad \text{with } \mathcal{B} := \{g_1, g_2, \dots, g_m\}_{LA}$$

$$f(\cdot) \neq 0 \Rightarrow \mathcal{R}(x_0, t) = (exp tf)\{exp \mathcal{I}\}_G x_0$$

where \mathcal{I} is the ideal generated by \mathcal{B} in $\mathcal{L} := \{f, g_1, g_2, \dots, g_m\}_{LA}$

"dim span $\left\{ ad_f^i g_j : 1 \leq j \leq m, 0 \leq i \leq n-1 \right\}_{x_0} = n$ " \Rightarrow "locally reachable around x_0 "

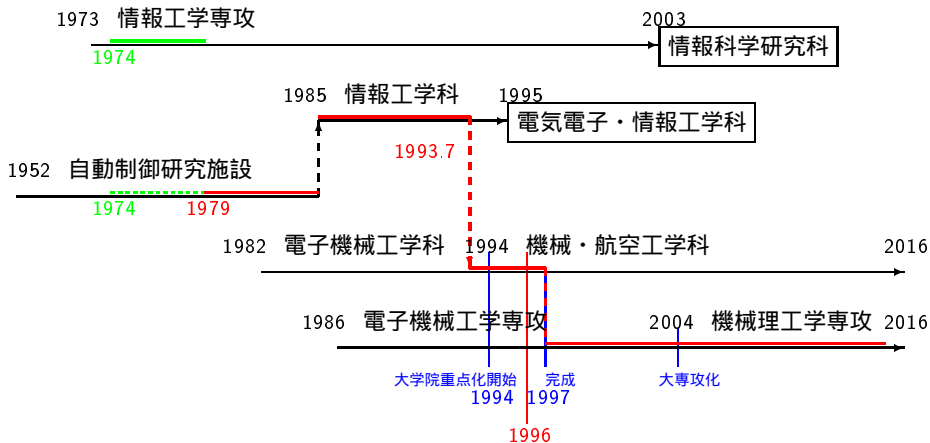
情報工学専攻 2 期生として自動制御研究施設・伊藤研究室に所属

① 修士課程 (1974.4-1976.3)

- 伊藤教授は Brockett 教授 (Harvard Univ.) のところへ (1974.9-1975.7?)
- 初めての学会口頭発表 (計測自動制御学会学術講演会 1975.11 東京)
- **修士論文：可変速度式予見制御系について**
 - Sarachik and Ragazzini: A two-dimensional feedback control system (Trans. AIEE, 1957)
 - 早勢, 市川: 目標値の未来値を最適に利用する追値制御 (SICE 論文集, 1969)
← 後の「モデル予測制御」の先駆的な論文

② 博士課程 (1976.4-1979.3)

- **微分幾何学的アプローチによる非線形系の可制御性に関する研究**
- 解説記事 (伊藤教授と共著, 1977.12)
- 多様体、リー群、トポロジーなどの勉強。しかしオリジナルな成果はです。
- 単位取得退学。運良く、伊藤研の助手に採用。



● 研究室名 (1996 年以降)

知能電子機械 → 電子機械制御 → 数理システム制御

● システム制御理論

① 動的システムの構造論：

- 構造化システムの可制御性—非零要素間に線形従属がある場合
- 構造化システム、コンパートメントシステムの可同定性

② デジタル制御系の解析・設計論

- MIMO 系の極限零点
- サンプル値制御系の H_2, H_∞ 制御
- 周期制御系の Floquet 定理 (差分方程式版)

● 制御応用

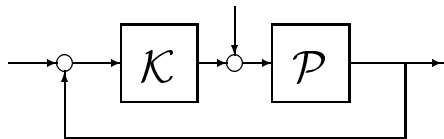
① ロボット制御

産業用、マスタースレーブ、多指ハンド、卓球ロボット

② 制振制御

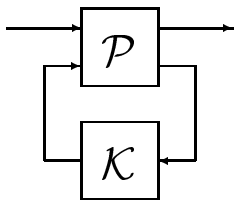
巨大吊り橋、セルフセンシング・アクチュエータ、エンジン振動

③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、…



$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases}$$



$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k \\ y_k = C_k x_k \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{k+1} = f_k(x_k) + g_k(x_k)u_k \\ y_k = h_k(x_k) \end{cases}$$

① はじめに

② 研究雑感 (初期の研究をふりかえって)

- 線形システムの構造可制御
- サンプル値系の極限零点と H_∞ 制御
- 巨大吊り橋主塔の制振制御

③ おわりに

● システム制御理論

① 動的システムの構造論：

- 構造化システムの可制御性—非零要素間に線形従属がある場合
- 構造化システム、コンパートメントシステムの可同定性

② デジタル制御系の解析・設計論

- MIMO 系の極限零点
- サンプル値制御系の H_2, H_∞ 制御
- 周期制御系の Floquet 定理 (差分方程式版)

● 制御応用

① ロボット制御

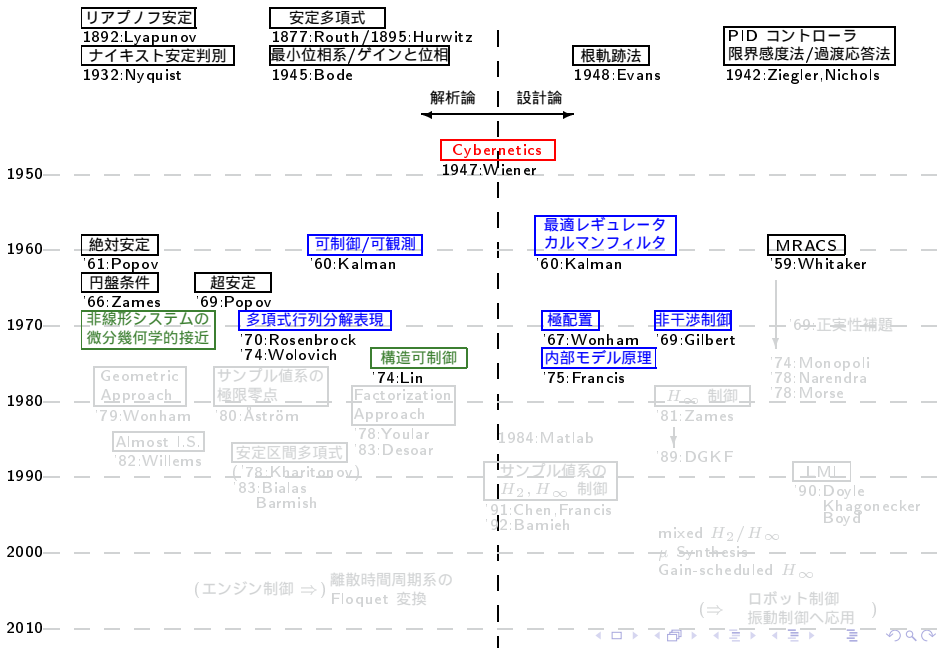
産業用、マスタースレーブ、多指ハンド、卓球ロボット

② 制振制御

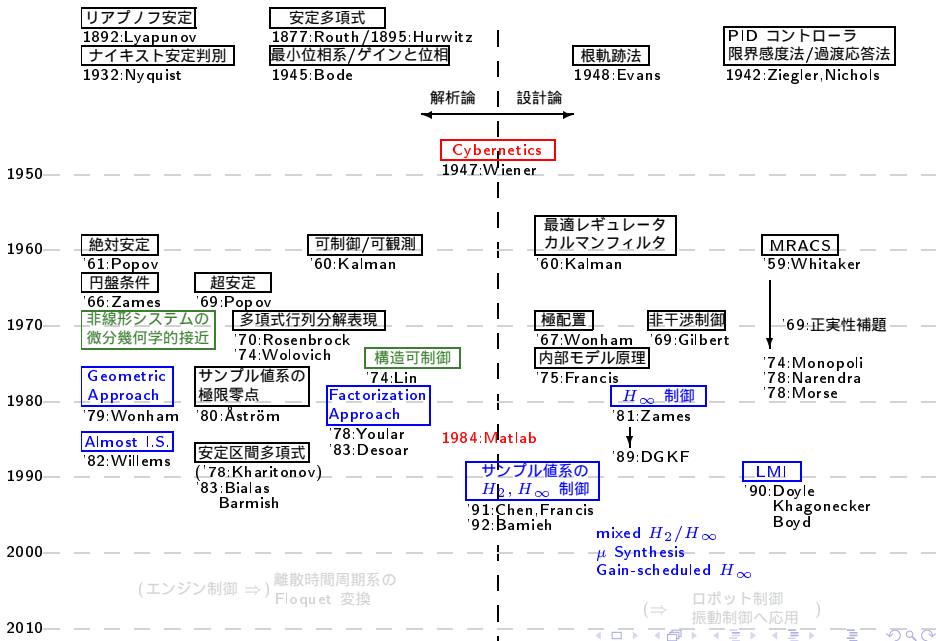
巨大吊り橋、セルフセンシング・アクチュエータ、エンジン振動

③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、…

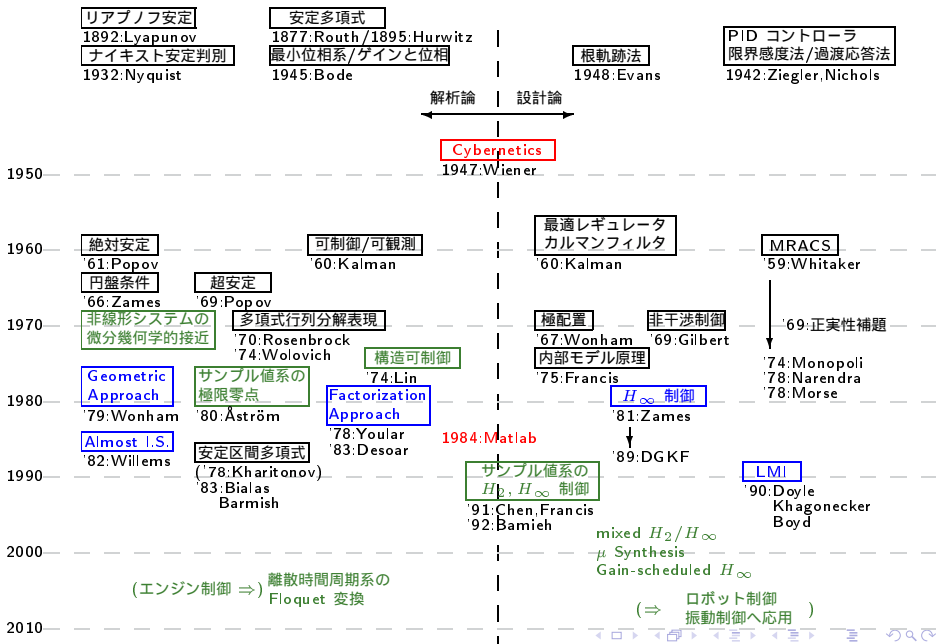
システム制御論のながれ (線形制御理論を中心に)



システム制御論のながれ (線形制御理論を中心に)



システム制御論のながれ (線形制御理論を中心に)



② 研究雑感（初期の研究を振り返って）

- 線形システムの構造可制御
- サンプル値系の極限零点と H_∞ 制御
- 巨大吊り橋主塔の制振制御

線形システムの構造可制御 (structurally controllable)

$$A = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1.5 & 0 & 1.1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.8 \\ 0.3 \end{bmatrix}$$

可制御でないが、構造可制御である

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1.2 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 0.8 \\ 0.3 \end{bmatrix}$$

可制御でないし、構造可制御でもない

$$A = \begin{bmatrix} \times & 0 & \times \\ 0 & 0 & 0 \\ \times & 0 & \times \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \times \\ \times \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \times & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & \times & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \times \\ \times \\ \times \end{bmatrix}$$

線形システムの構造可制御 (structurally controllable)

$$A = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1.5 & 0 & 1.1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.8 \\ 0.3 \end{bmatrix}$$

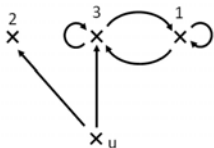
可制御でないが、**構造可制御である**

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1.2 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 0.8 \\ 0.3 \end{bmatrix}$$

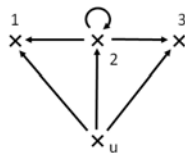
可制御でないし、**構造可制御でもない**

$$A = \begin{bmatrix} \times & 0 & \times \\ 0 & 0 & 0 \\ \times & 0 & \times \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \times \\ \times \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \times & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & \times & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \times \\ \times \\ \times \end{bmatrix}$$



(A, B) の有向グラフ $G(A, B)$



(A, B) の有向グラフ $G(A, B)$

(A, B) が構造可制御であるための必要十分条件は $\mathcal{G}(A, B)$ が *cactus*(サボテン) で張られることである。

cactus(サボテン) = a stem(茎) \cup a bud(芽) $\cup \dots \cup$ a bud(芽)



バズル: 1 入力 3 状態、3 状態は強連結、入力から少なくとも 1 つの状態へのパスあり; 構造可制御でない例を示せ

- MIMO 系への拡張
- 非零要素間に従属関係 (列拘束, 行拘束) がある場合への拡張 \Rightarrow 学位論文 (1982.3)
 - コンパートメントシステム: コンパートメントグラフと構造可制御
 - LCR 回路 (\rightarrow 質点系, 回転系): 回路網グラフと構造可制御
 - 中間標準系・ディスクリプタ系: $E\dot{x} = Ax + Bu$ の構造可制御
- 制御系の物理的構造に着目した制御理論展開へ
 - 定常特性に関するシステムタイプ
 - パラメータ変動にロバストなサーボ補償器やレギュレータ補償器の設計
 - 大規模システムの故障・診断など役立つ構造可同定性の問題など
- Matroid Theory in Dynamical Systems

(A, B) が構造可制御であるための必要十分条件は $\mathcal{G}(A, B)$ が *cactus*(サボテン) で張られることである。

cactus(サボテン) = a stem(茎) \cup a bud(芽) $\cup \dots \cup$ a bud(芽)



バズル: 1 入力 3 状態、3 状態は強連結、入力から少なくとも 1 つの状態へのパスあり; 構造可制御でない例を示せ

- MIMO 系への拡張
- 非零要素間に従属関係 (列拘束, 行拘束) がある場合への拡張 \Rightarrow 学位論文 (1982.3)
 - コンパートメントシステム: コンパートメントグラフと構造可制御
 - LCR 回路 (\rightarrow 質点系, 回転系): 回路網グラフと構造可制御
 - 中間標準系・ディスクリプタ系: $E\dot{x} = Ax + Bu$ の構造可制御
- 制御系の物理的構造に着目した制御理論展開へ
 - 定常特性に関するシステムタイプ
 - パラメータ変動にロバストなサーボ補償器やレギュレータ補償器の設計
 - 大規模システムの故障・診断など役立つ構造可同定性の問題など
- Matroid Theory in Dynamical Systems

(A, B) が構造可制御であるための必要十分条件は $\mathcal{G}(A, B)$ が *cactus*(サボテン) で張られることである。

cactus(サボテン) = a stem(茎) \cup a bud(芽) $\cup \dots \cup$ a bud(芽)



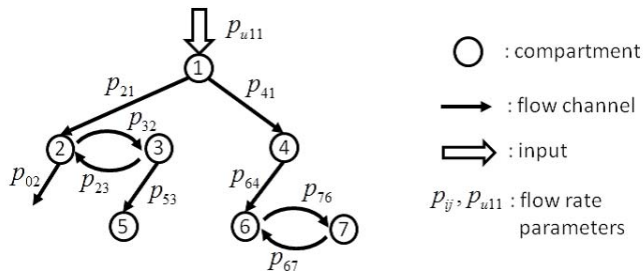
パズル: 1 入力 3 状態、3 状態は強連結、入力から少なくとも 1 つの状態へのパスあり; 構造可制御でない例を示せ

- MIMO 系への拡張
- 非零要素間に従属関係 (列拘束, 行拘束) がある場合への拡張 \Rightarrow 学位論文 (1982.3)
 - コンパートメントシステム: コンパートメントグラフと構造可制御
 - LCR 回路 (\rightarrow 質点系, 回転系): 回路網グラフと構造可制御
 - 中間標準系・ディスクリプタ系: $E\dot{x} = Ax + Bu$ の構造可制御
- 制御系の物理的構造に着目した制御理論展開へ
 - 定常特性に関するシステムタイプ
 - パラメータ変動にロバストなサーボ補償器やレギュレータ補償器の設計
 - 大規模システムの故障・診断など役立つ構造可同定性の問題など
- Matroid Theory in Dynamical Systems

コンパートメントシステムの構造可制御

コンパートメントシステムとは

保存則に基づいて物質の移動ダイナミクスを表現するモデル
(生物学、生態学、化学、経済などの分野)



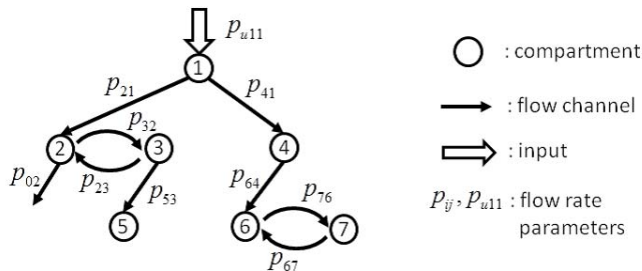
$$\dot{x} = A_p x + B_p u, \quad p = [p_{21}, p_{41}, \dots, p_{67}, p_{u11}]^T \in \mathbb{R}^{10}$$

$$A_p = \begin{bmatrix} -p_{21} - p_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & -p_{02} - p_{32} & p_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{32} & -p_{23} - p_{53} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{41} & 0 & 0 & -p_{64} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{53} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{64} & 0 & -p_{76} & p_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{76} & -p_{67} & 0 \end{bmatrix}, \quad B_p = \begin{bmatrix} p_{u11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

コンパートメントシステムの構造可制御

コンパートメントシステムとは

保存則に基づいて物質の移動ダイナミクスを表現するモデル
(生物学、生態学、化学、経済などの分野)



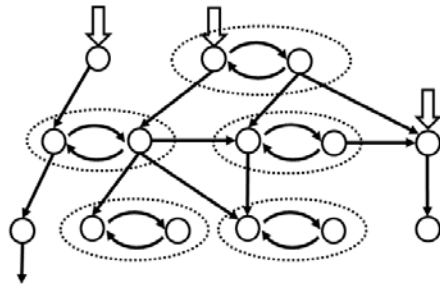
$$\dot{x} = A_p x + B_p u, \quad p = [p_{21}, p_{41}, \dots, p_{67}, p_{u11}]^T \in \mathbb{R}^{10}$$

$$A_p = \begin{bmatrix} -p_{21} - p_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & -p_{02} - p_{32} & p_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{32} & -p_{23} - p_{53} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{41} & 0 & 0 & -p_{64} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{53} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{64} & 0 & -p_{76} & p_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{76} & -p_{67} \end{bmatrix}, \quad B_p = \begin{bmatrix} p_{u11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

コンパートメントシステム (A_p, B_p) が構造可制御であるための必要十分条件はコンパートメントグラフ $G(A_p, B_p)$ がつぎの性質をもつことである。

- 1) 各"ソース"内の少なくとも1つのコンパートメントは励起されている。
- 2) 漏れのないすべての"シンク"は励起コンパートメントと互いに交わらないパスで結合されている。

$G(A_p, B_p)$ を強連結な部分グラフ $\{G_i\}_{i=1}^N$ に分割し、各 G_i を3種類に分類



: sources

: transits

: sinks

G_i が **ソース** とは
他のすべての $G_j (\forall j \neq i)$ から G_i
へ向かう枝がない

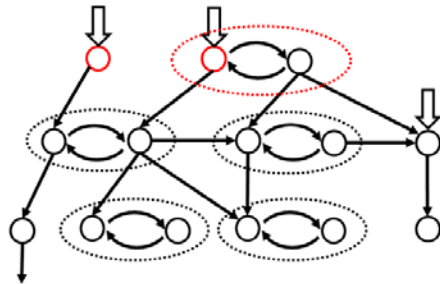
G_i が **シンク** とは
 G_i からどの $G_j (\forall j \neq i)$ へ向かう
枝もない

G_i が **トランジット** とは
ソースでもシンクでもない

コンパートメントシステム (A_p, B_p) が構造可制御であるための必要十分条件はコンパートメントグラフ $G(A_p, B_p)$ がつぎの性質をもつことである。

- 1) 各"ソース"内の少なくとも1つのコンパートメントは励起されている。
- 2) 漏れのないすべての"シンク"は励起コンパートメントと互いに交わらないパスで結合されている。

$G(A_p, B_p)$ を強連結な部分グラフ $\{G_i\}_{i=1}^N$ に分割し、各 G_i を3種類に分類



: sources

: transits

: sinks

G_i が **ソース** とは
他のすべての $G_j (\forall j \neq i)$ から G_i
へ向かう枝がない

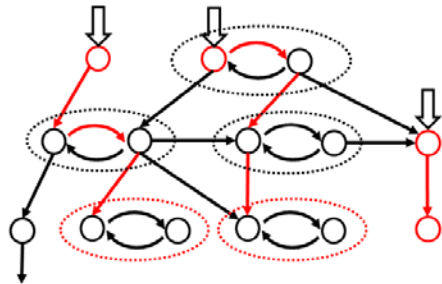
G_i が **シンク** とは
 G_i からどの $G_j (\forall j \neq i)$ へ向かう
枝もない

G_i が **トランジット** とは
ソースでもシンクでもない

コンパートメントシステム (A_p, B_p) が構造可制御であるための必要十分条件はコンパートメントグラフ $G(A_p, B_p)$ がつぎの性質をもつことである。

- 1) 各"ソース"内の少なくとも1つのコンパートメントは励起されている。
- 2) 漏れの無いすべての"シンク"は励起コンパートメントと互いに交わらないパスで結合されている。

$G(A_p, B_p)$ を強連結な部分グラフ $\{G_i\}_{i=1}^N$ に分割し、各 G_i を3種類に分類



: sources

: transits

: sinks

G_i が **ソース** とは
他のすべての $G_j (\forall j \neq i)$ から G_i
へ向かう枝がない

G_i が **シンク** とは
 G_i からどの $G_j (\forall j \neq i)$ へ向かう
枝もない

G_i が **トランジット** とは
ソースでもシンクでもない

コンパートメントシステム (A_p, B_p) が構造可制御であるための必要十分条件はコンパートメントグラフ $G(A_p, B_p)$ がつぎの性質をもつことである。

- 1) 各"ソース"内の少なくとも1つのコンパートメントは励起されている。
- 2) 漏れのないすべての"シンク"は励起コンパートメントと互いに交わらないパスで結合されている。

コンパートメントグラフを用いた直接証明

- 条件 1) は非零モードが generic に可制御であるための必要十分条件
- 条件 2) は零モードが generic に可制御であるための必要十分条件
- IEEE A.C. に投稿 (1981.9.23)
(注) ワープロ、eメール ×
⇒ タイプライタ (IBM)、Airmail
- 査読で
Corfmat and Morse (IEEE A.C. 1976.2)
を指摘

コンパートメントシステム (A_p, B_p) が構造可制御であるための必要十分条件はコンパートメントグラフ $\mathcal{G}(A_p, B_p)$ がつぎの性質をもつことである。

- 1) 各"ソース"内の少なくとも1つのコンパートメントは励起されている。
- 2) 漏れの無いすべての"シンク"は励起コンパートメントと互いに交わらないパスで結合されている。

(A_p, B_p) is structurally controllable if and only if

- for each $i \in \mathbf{k}$, there exists a path in \mathcal{G}_Π from node 0 to node i , and
- for all λ in the spectrum of A_0 ,

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \lambda I_n - A_0 & B_0 & B_S \\ C_{\bar{k}-S} & D_{\bar{k}-S} & 0 \end{bmatrix} \geq n \quad \text{for } \forall S \in \mathbf{k}^*$$

$$A_p := A_0 + \sum_{i=1}^k B_i P_i C_i, \quad B_p := B_0 + \sum_{i=1}^k B_i P_i D_i$$

A_0, B_0, B_i, C_i, D_i : fixed matrices,
 the elements of P_1, \dots, P_k : algebraically independent
 $\Pi := \{A_0, B_0, B_i, C_i, D_i, \mathbf{k}\}$
 $\mathbf{k} := \{1, \dots, k\}$, \mathbf{k}^* : the power set of \mathbf{k}
 Graph $\mathcal{G}_\Pi := \{\mathbf{k}, \mathcal{E}\}$
 the set of edges $\mathcal{E} := \{[j \rightarrow i] \mid H_{ij}(\lambda) \neq 0\}$

$$H_{ij}(\lambda) := \begin{cases} C_i (\lambda I_n - A_0)^{-1} B_j, & i, j \in \mathbf{k} \\ C_i (\lambda I_n - A_0)^{-1} B_0 + D_i, & i \in \mathbf{k}, j = 0 \end{cases}$$

コンパートメントシステム (A_p, B_p) が構造可制御であるための必要十分条件はコンパートメントグラフ $\mathcal{G}(A_p, B_p)$ がつぎの性質をもつことである。

- 1) 各"ソース"内の少なくとも1つのコンパートメントは励起されている。
- 2) 漏れのないすべての"シンク"は励起コンパートメントと互いに交わらないパスで結合されている。

- IEEE A.C. に投稿 (1981.9.23)

(注) ワープロ、eメール ×
⇒ タイプライタ (IBM)、Airmail

- 査読で

Corfmat and Morse (IEEE A.C. 1976.2)
を指摘

- 証明の全面改訂

- Manuscript recieved 1981.9.23;
revised 1982.3.29,
1982.8.12,
1982.12.7

(注) 分散制御の固定モードとの関係

コンパートメントシステム (A_p, B_p) が構造可制御であるための必要十分条件はコンパートメントグラフ $\mathcal{G}(A_p, B_p)$ がつぎの性質をもつことである。

- 1) 各"ソース"内の少なくとも1つのコンパートメントは励起されている。
- 2) 漏れのないすべての"シンク"は励起コンパートメントと互いに交わらないパスで結合されている。

● IEEE A.C. に投稿 (1981.9.23)

(注) ワープロ、eメール ×
⇒ タイプライタ (IBM)、Airmail

● 査読で

Corfmat and Morse (IEEE A.C. 1976.2)
を指摘

● 証明の全面改訂

● Manuscript received 1981.9.23;
revised 1982.3.29,
1982.8.12,
1982.12.7

(注) 分散制御の固定モードとの関係



コンパートメントシステム (A_p, B_p) が構造可制御であるための必要十分条件はコンパートメントグラフ $G(A_p, B_p)$ がつぎの性質をもつことである。

- 1) 各"ソース"内の少なくとも1つのコンパートメントは励起されている。
- 2) 漏れの無いすべての"シンク"は励起コンパートメントと互いに交わらないパスで結合されている。

- 非零要素間に従属関係 (列拘束, 行拘束) がある場合への拡張 ⇒ 学位論文 (1982.3)
 - コンパートメントシステム: コンパートメントグラフと構造可制御
 - LCR 電気回路 (→ 質点系, 回転系): 回路網グラフと構造可制御
 - 中間標準系・ディスクリプタ系: $E\dot{x} = Ax + Bu$ の構造可制御
- 制御系の物理的構造に着目した制御理論展開へ
 - 定常特性に関するシステムタイプ
 - パラメータ変動にロバストなサーボ補償器やレギュレータ補償器の設計
 - 大規模システムの故障・診断など役立つ構造可同定性の問題など
- Matroid Theory in Dynamical Systems (Murota, Iri)

きっかけは ……

初めての国際会議：
ディスクリプタ系の構造可制御 (1984.7)

ホテルの朝食で、偶然、Siljak 教授と同席
客員研究員 (日本人) が話題に



IFAC 9th World Congress in Budapest

きっかけは ……

初めての国際会議：
ディスクリプタ系の構造可制御 (1984.7)

ホテルの朝食で、偶然、Siljak 教授と同席
客員研究員 (日本人) が話題に

客員研究員：
荒木先生 (京大) 池田先生 (阪大)
太田先生 (神戸大)



IFAC 9th World Congress in Budapest

きっかけは ……

初めての国際会議：
ディスクリプタ系の構造可制御 (1984.7)

ホテルの朝食で、偶然、Siljak 教授と同席
客員研究員（日本人）が話題に

客員研究員：
荒木先生（京大） 池田先生（阪大）
太田先生（神戸大）

この学会の後、
オーストリア ドイツ (Linnemann)
オランダ (J.Willems)

オーストリア・ウィーンの
ホテルで池田先生と同室



IFAC 9th World Congress in Budapest

Santa Clara University (1985.8–1986.8)

初めての国際会議：
ディスクリプタ系の構造可制御 (1984.7)



研究テーマ (1985.8)：
構造化分散制御系の almost 不変部分空間



Siljak 教授の研究室

ユーゴスラビア出身 / オリンピック水球選手

サンタクララはシリコンバレーの中心

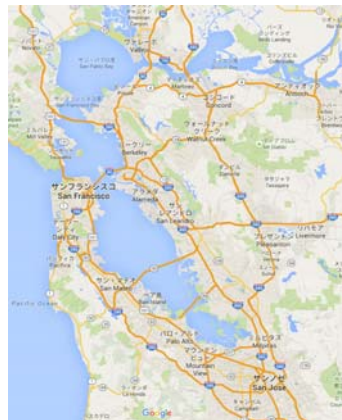
Stanford University (@Palo Alto) : 20 分

UC Berkeley : 75 分

Monterey/Carmel : 90 分 (市長: クリント・イーストウッド)

Napa Valley : 120 分

Yosemite National Park : 200 分



©Google マップ

Santa Clara University (1985.8–1986.8)

初めての国際会議：
ディスクリプタ系の構造可制御 (1984.7)



研究テーマ (1985.8)：
構造化分散制御系の almost 不変部分空間

サンタクララはシリコンバレーの中心

Stanford University (@Palo Alto) : 20 分

UC Berkeley : 75 分

Monterey/Carmel : 90 分 (市長: クリント・イーストウッド)

Napa Valley : 120 分

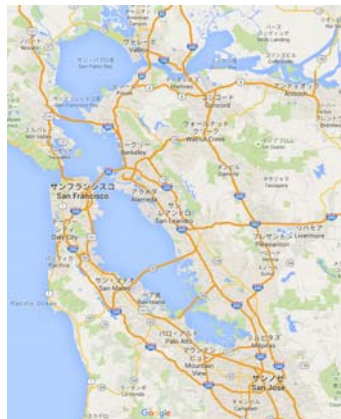
Yosemite National Park : 200 分



Siljak 教授の研究室

M.Vidyasagar: Control Systems Synthesis: A factorization Approach, MIT Press, 1985. (\$ 35.00)

W.Wohnham: Linear Multivariable Control: A Geometric Approach, Third Edition, Springer, 1985. (\$ 42.00)



©Google マップ

初めての国際会議：

ディスクリプタ系の構造可制御 (1984.7)



研究テーマ (1985.8)：

分散構造化システムの almost 不変部分空間



Siljak 教授の研究室



ヨセミテ国立公園 (1986 夏)

初めての国際会議：

ディスクリプタ系の構造可制御 (1984.7)



研究テーマ (1985.8)：

分散構造化システムの almost 不変部分空間



Siljak 教授の研究室



研究室の仲間と (1986.8)

初めての国際会議：

ディスクリプタ系の構造可制御 (1984.7)



研究テーマ (1985.8)：

分散構造化システムの almost 不変部分空間



Siljak 教授の研究室



Y. Hayakawa and D.D. Siljak:
On almost invariant subspace of structural
systems and decentralized control,
IEEE A.C., 1989.10

(received 1987.3.16, revised 1988.3.22)



The Bellman Award 2010 (AACC)



In Baltimore after the Speech(AACC2010)

初めての国際会議：

ディスクリプタ系の構造可制御 (1984.7)



研究テーマ (1985.8)：

分散構造化システムの almost 不変部分空間



Siljak 教授の研究室



Y. Hayakawa and D.D. Siljak:
On almost invariant subspace of structural
systems and decentralized control,
IEEE A.C., 1989.10

(received 1987.3.16, revised 1988.3.22)



The Bellman Award 2010 (AACC)



退職記念 (大阪 2012.11.3)

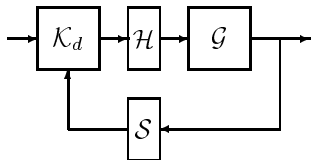
② 研究雑感（初期の研究を振り返って）

- 線形システムの構造可制御
- サンプル値系の極限零点と H_∞ 制御
- 巨大吊り橋主塔の制振制御

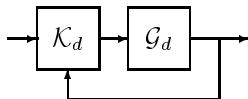
サンプル値系の極限零点

- モデルマッチング制御、モデル規範形適応制御

⇒ 閉ループ特性を望みの動特性 (規範モデル) に一致させることを目的とした制御



サンプル値制御系



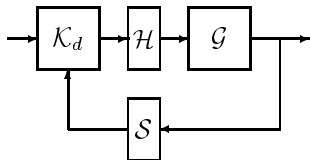
$$G_d := SGH$$

離散時間制御系

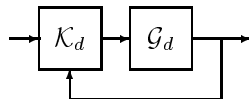
- どのようなコントローラ K_d を用いても、制御対象の不安定零点は閉ループの零点に残る。
⇒ 規範モデルは制御対象の不安定零点を持たざるを得ない
- 離散時間 G_d の零点：連続時間 G の零点やサンプリング時間 h との関係
- 一入力一出力系 \Leftarrow Åström が極限零点 ($h \rightarrow 0$) を明らかに (1980)

- モデルマッチング制御、モデル規範形適応制御

⇒ 閉ループ特性を望みの動特性 (規範モデル) に一致させることを目的とした制御



サンプル値制御系



$$G_d := SGH$$

離散時間制御系

- どのようなコントローラ K_d を用いても、制御対象の不安定零点は閉ループの零点に残る。

⇒ **規範モデルは制御対象の不安定零点を持たざるを得ない**

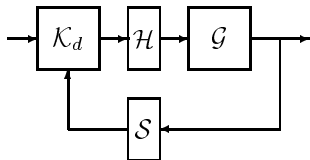
- 離散時間 G_d の零点：連続時間 G の零点やサンプリング時間 h との関係

- 一入力一出力系 \Leftarrow Åström が極限零点 ($h \rightarrow 0$) を明らかに (1980)

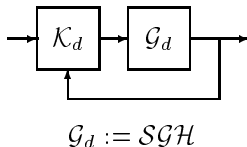
サンプル値系の極限零点

- モデルマッチング制御、モデル規範形適応制御

⇒ 閉ループ特性を望みの動特性 (規範モデル) に一致させることを目的とした制御



サンプル値制御系

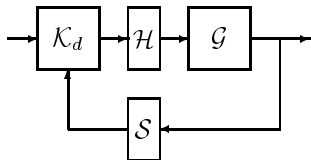


離散時間制御系

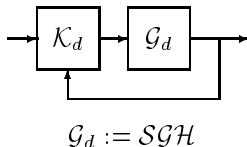
- どのようなコントローラ K_d を用いても、制御対象の不安定零点は閉ループの零点に残る。
⇒ **規範モデルは制御対象の不安定零点を持たざるを得ない**
- 離散時間 G_d の零点：連続時間 G の零点やサンプリング時間 h との関係
- 一入力一出力系 \Leftarrow Åström が極限零点 ($h \rightarrow 0$) を明らかに (1980)

- モデルマッチング制御、モデル規範形適応制御

⇒ 閉ループ特性を望みの動特性 (規範モデル) に一致させることを目的とした制御



サンプル値制御系



離散時間制御系

- どのようなコントローラ K_d を用いても、制御対象の不安定零点は閉ループの零点に残る。
⇒ **規範モデルは制御対象の不安定零点を持たざるを得ない**
- 離散時間 G_d の零点：連続時間 G の零点やサンプリング時間 h との関係
- 一入力一出力系 \Leftarrow Åström が極限零点 ($h \rightarrow 0$) を明らかに (1980)

サンプル値系の極限零点 (一入力一出力系)

Åström et al.: Proc. 19th IEEE Conf. Decis. Control Symp. Adapt. Processes(1980)

$\mathcal{G}_d := SGH$

サンプリング時間: h

\mathcal{G} の伝達関数

$$G(s) = K \frac{(s - z_1)(s - z_2) \cdots (s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2) \cdots (s - p_n)}$$

\mathcal{G}_d のパルス伝達関数

$$G_d(z) = \hat{K} \frac{(z - \hat{z}_1)(z - \hat{z}_2) \cdots (z - \hat{z}_{n-1})}{(z - \hat{p}_1)(z - \hat{p}_2) \cdots (z - \hat{p}_n)}$$

相対次数 $r := n - m (> 0)$

- 極の関係: $\hat{p}_i = \exp(p_i h)$ for $i = 1, 2, \dots, n, \forall h$
- 零点の関係: m の値に無関係に、 $n - 1$ 個の零点がある。そのうち
 - m 個の零点は、 $\hat{z}_i \rightarrow \exp(z_i h)$ as $h \rightarrow 0$
 - 残りの $r - 1$ 個の零点は、 $h \rightarrow 0$ に連れて、多項式 $B_r(z)$ の根に近づく。

$$B_r(z) := \sum_{i=1}^r b_k^r z^{r-k}, \quad b_k^r := k b_k^{r-1} + (r - k + 1) b_{k-1}^{r-1}, \quad b_1^r = b_r^r := 1$$

(注1) $B_r(z)$ は相対次数 r だけで決まる。 (注2) z_d が $B_r(z) = 0$ の根ならば、 $1/z_d$ も根である。

$B_2(z) = z + 1$	(-1)
$B_3(z) = z^2 + 4z + 1$	-3.7321
$B_4(z) = z^3 + 11z^2 + 11z + 1$	(-1,) -9.9899
$B_5(z) = z^4 + 26z^3 + 66z^2 + 26z + 1$	-2.3225, -23.2039
$B_6(z) = z^5 + 57z^4 + 302z^3 + 302z^2 + 57z + 1$	(-1)

サンプル値系の極限零点 (一入力一出力系)

Åström et al.: Proc. 19th IEEE Conf. Decis. Control Symp. Adapt. Processes(1980)

$G_d := SGH$

サンプリング時間: h

G の伝達関数

$$G(s) = K \frac{(s - z_1)(s - z_2) \cdots (s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2) \cdots (s - p_n)}$$

G_d のパルス伝達関数

$$G_d(z) = \hat{K} \frac{(z - \hat{z}_1)(z - \hat{z}_2) \cdots (z - \hat{z}_{n-1})}{(z - \hat{p}_1)(z - \hat{p}_2) \cdots (z - \hat{p}_n)}$$

相対次数 $r := n - m (> 0)$

- 極の関係: $\hat{p}_i = \exp(p_i h)$ for $i = 1, 2, \dots, n, \forall h$
- 零点の関係: m の値に無関係に、 $n - 1$ 個の零点がある。そのうち
 - m 個の零点は、 $\hat{z}_i \rightarrow \exp(z_i h)$ as $h \rightarrow 0$
 - 残りの $r - 1$ 個の零点は、 $h \rightarrow 0$ に連れて、多項式 $B_r(z)$ の根に近づく。

$$B_r(z) := \sum_{i=1}^r b_k^r z^{r-k}, \quad b_k^r := k b_k^{r-1} + (r - k + 1) b_{k-1}^{r-1}, \quad b_1^r = b_r^r := 1$$

(注 1) $B_r(z)$ は相対次数 r だけで決まる。 (注 2) z_d が $B_r(z) = 0$ の根ならば、 $1/z_d$ も根である。

$B_2(z) = z + 1$	(-1)
$B_3(z) = z^2 + 4z + 1$	-3.7321
$B_4(z) = z^3 + 11z^2 + 11z + 1$	(-1,) - 9.9899
$B_5(z) = z^4 + 26z^3 + 66z^2 + 26z + 1$	-2.3225, -23.2039
$B_6(z) = z^5 + 57z^4 + 302z^3 + 302z^2 + 57z + 1$	(-1) □ → 4.5 倍 0, -6 倍 21.84 倍 ▶ ≡ 🔍 ↻

サンプル値系の極限零点 (一入力一出力系)

Åström et al.: Proc. 19th IEEE Conf. Decis. Control Symp. Adapt. Processes(1980)

$G_d := SGH$

サンプリング時間: h

G の伝達関数

$$G(s) = K \frac{(s - z_1)(s - z_2) \cdots (s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2) \cdots (s - p_n)}$$

G_d のパルス伝達関数

$$G_d(z) = \hat{K} \frac{(z - \hat{z}_1)(z - \hat{z}_2) \cdots (z - \hat{z}_{n-1})}{(z - \hat{p}_1)(z - \hat{p}_2) \cdots (z - \hat{p}_n)}$$

相対次数 $r := n - m (> 0)$

- 極の関係: $\hat{p}_i = \exp(p_i h)$ for $i = 1, 2, \dots, n, \forall h$
- 零点の関係: m の値に無関係に、 $n - 1$ 個の零点がある。そのうち
 - m 個の零点は、 $\hat{z}_i \rightarrow \exp(z_i h)$ as $h \rightarrow 0$
 - 残りの $r - 1$ 個の零点は、 $h \rightarrow 0$ に連れて、多項式 $B_r(z)$ の根に近づく。

$$B_r(z) := \sum_{i=1}^r b_k^r z^{r-k}, \quad b_k^r := k b_k^{r-1} + (r - k + 1) b_{k-1}^{r-1}, \quad b_1^r = b_r^r := 1$$

(注1) $B_r(z)$ は相対次数 r だけで決まる。 (注2) z_d が $B_r(z) = 0$ の根ならば、 $1/z_d$ も根である。

$$B_2(z) = z + 1$$

$$(-1)$$

$$B_3(z) = z^2 + 4z + 1$$

$$-3.7321$$

$$B_4(z) = z^3 + 11z^2 + 11z + 1$$

$$(-1), -9.9899$$

$$B_5(z) = z^4 + 26z^3 + 66z^2 + 26z + 1$$

$$-2.3225, -23.2039$$

$$B_6(z) = z^5 + 57z^4 + 302z^3 + 302z^2 + 57z + 1$$

$$(-1), -4.5491, -6.52184$$

サンプル値系の極限零点 (一入力一出力系)

Åström et al.: Proc. 19th IEEE Conf. Decis. Control Symp. Adapt. Processes(1980)

$G_d := SGH$

サンプリング時間: h

G の伝達関数

$$G(s) = K \frac{(s - z_1)(s - z_2) \cdots (s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2) \cdots (s - p_n)}$$

G_d のパルス伝達関数

$$G_d(z) = \hat{K} \frac{(z - \hat{z}_1)(z - \hat{z}_2) \cdots (z - \hat{z}_{n-1})}{(z - \hat{p}_1)(z - \hat{p}_2) \cdots (z - \hat{p}_n)}$$

相対次数 $r := n - m (> 0)$

- 極の関係: $\hat{p}_i = \exp(p_i h)$ for $i = 1, 2, \dots, n, \forall h$
- 零点の関係: m の値に無関係に、 $n - 1$ 個の零点がある。そのうち
 - m 個の零点は、 $\hat{z}_i \rightarrow \exp(z_i h)$ as $h \rightarrow 0$
 - 残りの $r - 1$ 個の零点は、 $h \rightarrow 0$ に連れて、多項式 $B_r(z)$ の根に近づく。

$$B_r(z) := \sum_{i=1}^r b_k^r z^{r-k}, \quad b_k^r := k b_k^{r-1} + (r - k + 1) b_{k-1}^{r-1}, \quad b_1^r = b_r^r := 1$$

(注 1) $B_r(z)$ は相対次数 r だけで決まる。 (注 2) z_d が $B_r(z) = 0$ の根ならば、 $1/z_d$ も根である。

$B_2(z) = z + 1$	(-1)
$B_3(z) = z^2 + 4z + 1$	-3.7321
$B_4(z) = z^3 + 11z^2 + 11z + 1$	(-1,) -9.9899
$B_5(z) = z^4 + 26z^3 + 66z^2 + 26z + 1$	-2.3225, -23.2039
$B_6(z) = z^5 + 57z^4 + 302z^3 + 302z^2 + 57z + 1$	(-1,) -4.5449, -51.2184

$\mathcal{G}_d := SGH$ サンプルング時間: h

\mathcal{G} の状態方程式 (可制御、可観測)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \quad y = Cx \\ x &\in \mathbb{R}^n, \quad u, y \in \mathbb{R}^q \end{aligned}$$

$$\Gamma(s) := \begin{bmatrix} A - sI_n & B \\ C & 0 \end{bmatrix}$$

\mathcal{G}_d の状態方程式

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \hat{A}x_k + \hat{B}u_k, \quad y_k = \hat{C}x_k \\ \hat{A} &:= \exp(Ah), \quad \hat{B} := \int_0^h \exp(A\tau)Bd\tau \\ \hat{C} &:= C \end{aligned}$$

$$\hat{\Gamma}(z) := \begin{bmatrix} \hat{A} - zI_n & \hat{B} \\ \hat{C} & 0 \end{bmatrix}$$

$\mathcal{G}_d := SGH$ サンプルング時間: h

\mathcal{G} の状態方程式 (可制御、可観測)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \quad y = Cx \\ x &\in \mathbb{R}^n, \quad u, y \in \mathbb{R}^q \end{aligned}$$

$$\Gamma(s) := \begin{bmatrix} A - sI_n & B \\ C & 0 \end{bmatrix}$$

$$\det \Gamma(s) \neq 0, \quad \deg\{\det \Gamma(s)\} := m$$

↓

\mathcal{G} の零点 ($\det \Gamma(s) = 0$ の根) は m 個 $\{z_1, \dots, z_m\}$ (注) $n - m = \sum_{i=1}^q r_i$
 正則ペンシル $\Gamma(s)$ の無限単因子 (infinite elementary divisors) の次数を $\{r_1 + 1, \dots, r_q + 1\}$

\mathcal{G}_d の状態方程式

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \hat{A}x_k + \hat{B}u_k, \quad y_k = \hat{C}x_k \\ \hat{A} &:= \exp(Ah), \quad \hat{B} := \int_0^h \exp(A\tau)Bd\tau \\ \hat{C} &:= C \end{aligned}$$

$$\hat{\Gamma}(z) := \begin{bmatrix} \hat{A} - zI_n & \hat{B} \\ \hat{C} & 0 \end{bmatrix}$$

$\mathcal{G}_d := SGH$ サンプルング時間: h

\mathcal{G} の状態方程式 (可制御、可観測)

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

$$x \in \mathbb{R}^n, \quad u, y \in \mathbb{R}^q$$

$$\Gamma(s) := \begin{bmatrix} A - sI_n & B \\ C & 0 \end{bmatrix}$$

$$\det \Gamma(s) \neq 0, \quad \deg\{\det \Gamma(s)\} := m$$

↓

\mathcal{G} の零点 ($\det \Gamma(s) = 0$ の根) は m 個 $\{z_1, \dots, z_m\}$ (注) $n - m = \sum_{i=1}^q r_i$
 正則ペンシル $\Gamma(s)$ の無限単因子 (infinite elementary divisors) の次数を $\{r_1 + 1, \dots, r_q + 1\}$

\mathcal{G}_d の状態方程式

$$x_{k+1} = \hat{A}x_k + \hat{B}u_k, \quad y_k = \hat{C}x_k$$

$$\hat{A} := \exp(Ah), \quad \hat{B} := \int_0^h \exp(A\tau)Bd\tau$$

$$\hat{C} := C$$

$$\hat{\Gamma}(z) := \begin{bmatrix} \hat{A} - zI_n & \hat{B} \\ \hat{C} & 0 \end{bmatrix}$$

Y.Hayakawa, S.Hosoe, and M.Ito: Systems & Control Letters, Vol.2 (1983.2)

(Received 1982.8)

$\Gamma(s)$ の無限単因子の次数の 最大値と最小値の差が 1 以下 (たとえば, $r_i = r$ ($i = 1, \dots, \ell$),
 $r_i = r + 1$ ($i = \ell + 1, \dots, q$)) ならば, \mathcal{G}_d の零点 ($\det \hat{\Gamma}(z) = 0$ の根) は $(n - q)$ 個あり、そのうち

- m 個の零点は、 $\hat{z}_i \rightarrow \exp(z_i h)$ as $h \rightarrow 0$
- 残りの $n - m - q$ 個の零点は、 $h \rightarrow 0$ に連れて、多項式 $B_r(z)^\ell B_{r+1}^{q-\ell}(z)$ の根に近づく。

"正則ペンスシル canonical form"

$\Gamma(s) := \begin{bmatrix} A - sI_n & B \\ C & 0 \end{bmatrix}$ に対して $P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ 0 & P_{22} \end{bmatrix}$, $Q = \begin{bmatrix} P_{11}^{-1} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix}$ が存在して

$$P\Gamma(s)Q = \begin{bmatrix} A_f - sI_m & 0 & 0 \\ 0 & A_\infty - sI_{n-m} & B_\infty \\ 0 & C_\infty & 0 \end{bmatrix}$$

where $n - m = \sum_{i=1}^q r_i$

$A_\infty := b - \text{diag}(N_{r_1}, \dots, N_{r_q})$, $B_\infty := b - \text{diag}(b_{r_1}, \dots, b_{r_q})$, $C_\infty := b - \text{diag}(c_{r_1}, \dots, c_{r_q})$

$$N_{r_i} := \begin{bmatrix} 0 & 1 & & 0 \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \\ & & & & 1 \\ 0 & & & & 0 \end{bmatrix}_{r_i \times r_i}, \quad b_i := \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{r_i \times 1}, \quad c_i := [1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times r_i}$$

- ディスクリプタ系の可制御性の研究： $sE - A$ の canonical form の利用
- 制御理論シンポ（泊まり込み）中、一晩のディスカッションで、証明の骨格が完成
- Systems & Control Lettes 論文投稿 1982.8 掲載 1983.2

"正則ペンスシル canonical form"

$\Gamma(s) := \begin{bmatrix} A - sI_n & B \\ C & 0 \end{bmatrix}$ に対して $P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ 0 & P_{22} \end{bmatrix}$, $Q = \begin{bmatrix} P_{11}^{-1} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix}$ が存在して

$$P\Gamma(s)Q = \begin{bmatrix} A_f - sI_m & 0 & 0 \\ 0 & A_\infty - sI_{n-m} & B_\infty \\ 0 & C_\infty & 0 \end{bmatrix}$$

where $n - m = \sum_{i=1}^q r_i$

$A_\infty := b - \text{diag}(N_{r_1}, \dots, N_{r_q})$, $B_\infty := b - \text{diag}(b_{r_1}, \dots, b_{r_q})$, $C_\infty := b - \text{diag}(c_{r_1}, \dots, c_{r_q})$

$$N_{r_i} := \begin{bmatrix} 0 & 1 & & 0 \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \\ & & & & 1 \\ 0 & & & & 0 \end{bmatrix}_{r_i \times r_i}, \quad b_i := \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{r_i \times 1}, \quad c_i := [1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times r_i}$$

- ディスクリプタ系の可制御性の研究： $sE - A$ の canonical form の利用
- 制御理論シンポ（泊まり込み）中、一晩のディスカッションで、証明の骨格が完成
- Systems & Control Lettes 論文投稿 1982.8 掲載 1983.2

"正則ペンスシル canonical form"

$\Gamma(s) := \begin{bmatrix} A - sI_n & B \\ C & 0 \end{bmatrix}$ に対して $P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ 0 & P_{22} \end{bmatrix}$, $Q = \begin{bmatrix} P_{11}^{-1} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix}$ が存在して

$$P\Gamma(s)Q = \begin{bmatrix} A_f - sI_m & 0 & 0 \\ 0 & A_\infty - sI_{n-m} & B_\infty \\ 0 & C_\infty & 0 \end{bmatrix}$$

where $n - m = \sum_{i=1}^q r_i$

$A_\infty := b - \text{diag}(N_{r_1}, \dots, N_{r_q})$, $B_\infty := b - \text{diag}(b_{r_1}, \dots, b_{r_q})$, $C_\infty := b - \text{diag}(c_{r_1}, \dots, c_{r_q})$

$$N_{r_i} := \begin{bmatrix} 0 & 1 & & 0 \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \\ & & & & 1 \\ 0 & & & & 0 \end{bmatrix}_{r_i \times r_i}, \quad b_i := \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{r_i \times 1}, \quad c_i := [1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times r_i}$$

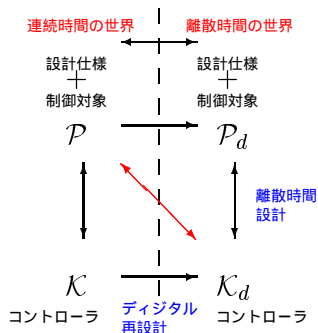
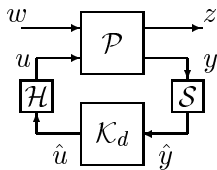
- ディスクリプタ系の可制御性の研究： $sE - A$ の canonical form の利用
- 制御理論シンポ（泊まり込み）中、一晩のディスカッションで、証明の骨格が完成
- Systems & Control Lettes 論文投稿 1982.8 掲載 1983.2

サンプル値系の H_∞ 制御

\mathcal{P} : 一般化制御対象

\mathcal{K}_d : デジタルコントローラ

(h : サンプルング時間)



入出力写像 $\mathcal{G}_{wz} : L_2[0, \infty) \rightarrow L_2[0, \infty)$
 $w \mapsto z$

H_∞ ノルムと H_∞ 制御問題

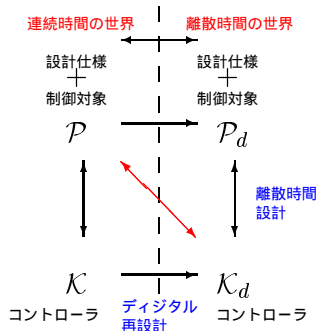
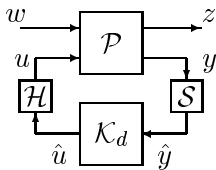
$$\|\mathcal{G}_{wz}\|_\infty := \sup_{w \neq 0 \in L_2[0, \infty)} \frac{\|z\|_{L_2}}{\|w\|_{L_2}} \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \min_{\mathcal{K}_d} \|\mathcal{G}_{wz}\|_\infty$$

サンプル値系の H_∞ 制御

\mathcal{P} : 一般化制御対象

\mathcal{K}_d : デジタルコントローラ

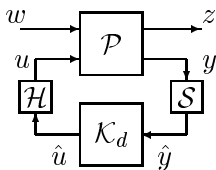
(h : サンプルング時間)



入出力写像 $\mathcal{G}_{wz} : L_2[0, \infty) \rightarrow L_2[0, \infty)$
 $w \mapsto z$

H_∞ ノルムと H_∞ 制御問題

$$\|\mathcal{G}_{wz}\|_\infty := \sup_{w \neq 0 \in L_2[0, \infty)} \frac{\|z\|_{L_2}}{\|w\|_{L_2}} \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \min_{\mathcal{K}_d} \|\mathcal{G}_{wz}\|_\infty$$



$$\mathcal{P} : \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) = C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \\ y(t) = C_2 x(t) \end{cases}$$

$$x(t) \in \mathbb{R}^n, w(t) \in \mathbb{R}^{m_1}, u(t) \in \mathbb{R}^{m_2}$$

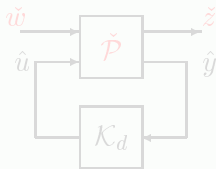
$$z(t) \in \mathbb{R}^{p_1}, y(t) \in \mathbb{R}^{p_2}$$

$$\mathcal{S} : \hat{y}_k := y(kh)$$

$$\mathcal{H} : u(t) := \hat{u}_k \text{ for } kh \leq t < (k+1)h$$

サンプル値制御系のリフティンク

Y.Yamamoto(1990), H.Toivonen(1992), B.Bamieh, J.Pearson(1992)



$$\check{w}_k \in L_2[0, h]^{m_1}, \quad \check{z}_k \in L_2[0, h]^{p_1}$$

$$\check{\mathcal{P}} : \begin{cases} \hat{x}_{k+1} = \hat{A} \hat{x}_k + \hat{B}_1 \check{w}_k + \hat{B}_2 \hat{u}_k \\ \check{z}_k = \hat{C}_1 \hat{x}_k + \hat{D}_{11} \check{w}_k + \hat{D}_{12} \hat{u}_k \\ \hat{y}_k = \hat{C}_2 \hat{x}_k \end{cases}$$

$$\hat{x}_k := x(kh) \in \mathbb{R}^n, \hat{u}_k \in \mathbb{R}^{m_2}, \hat{y}_k \in \mathbb{R}^{p_2}$$

$$\hat{A} := \exp(Ah), \quad \hat{B}_2 := \int_0^h \exp(A\tau) B_2 d\tau, \quad \hat{C}_2 := C_2$$

$$\hat{B}_1 : L_2[0, h]^{m_1} \rightarrow \mathbb{R}^n;$$

$$\hat{C}_1 : \mathbb{R}^n \rightarrow L_2[0, h]^{p_1};$$

$$\hat{D}_{11} : L_2[0, h]^{m_1} \rightarrow L_2[0, h]^{p_1};$$

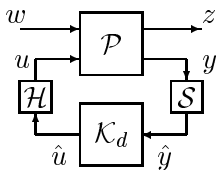
$$\hat{D}_{12} : \mathbb{R}^{m_2} \rightarrow L_2[0, h]^{p_1};$$

$$\hat{B}_1 \check{w}_k := \int_0^h \exp(A(h-\tau)) B_1 \check{w}_k(\tau) d\tau$$

$$(\hat{C}_1 \hat{x}_k)(\theta) := C_1 \exp(A\theta) \hat{x}_k$$

$$(\hat{D}_{11} \check{w}_k)(\theta) := D_{11} \check{w}_k(\theta) + \int_0^\theta C_1 \exp(A(\theta-\tau)) \check{w}_k(\tau) d\tau$$

$$(\hat{D}_{12} \hat{u}_k)(\theta) := (D_{12} + \int_0^\theta C_1 \exp(A(\theta-\tau)) B_2(\tau) d\tau) \hat{u}_k$$



$$P : \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) = C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \\ y(t) = C_2 x(t) \end{cases}$$

$$x(t) \in \mathbb{R}^n, w(t) \in \mathbb{R}^{m_1}, u(t) \in \mathbb{R}^{m_2}$$

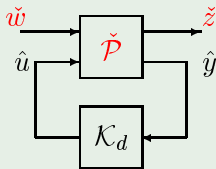
$$z(t) \in \mathbb{R}^{p_1}, y(t) \in \mathbb{R}^{p_2}$$

$$S : \hat{y}_k := y(kh)$$

$$H : u(t) := \hat{u}_k \text{ for } kh \leq t < (k+1)h$$

サンプル値制御系のリフティンク

Y.Yamamoto(1990), H.Toivonen(1992), B.Bamieh, J.Pearson(1992)



$$\check{w}_k \in L_2[0, h]^{m_1}, \quad \check{z}_k \in L_2[0, h]^{p_1}$$

$$\check{P} : \begin{cases} \hat{x}_{k+1} = \hat{A} \hat{x}_k + \hat{B}_1 \check{w}_k + \hat{B}_2 \hat{u}_k \\ \check{z}_k = \hat{C}_1 \hat{x}_k + \hat{D}_{11} \check{w}_k + \hat{D}_{12} \hat{u}_k \\ \hat{y}_k = \hat{C}_2 \hat{x}_k \end{cases}$$

$$\hat{x}_k := x(kh) \in \mathbb{R}^n, \hat{u}_k \in \mathbb{R}^{m_2}, \hat{y}_k \in \mathbb{R}^{p_2}$$

$$\hat{A} := \exp(Ah), \quad \hat{B}_2 := \int_0^h \exp(A\tau) B_2 d\tau, \quad \hat{C}_2 := C_2$$

$$\hat{B}_1 : L_2[0, h]^{m_1} \rightarrow \mathbb{R}^n;$$

$$\hat{C}_1 : \mathbb{R}^n \rightarrow L_2[0, h]^{p_1};$$

$$\hat{D}_{11} : L_2[0, h]^{m_1} \rightarrow L_2[0, h]^{p_1};$$

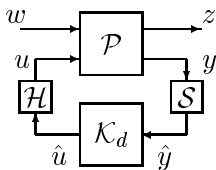
$$\hat{D}_{12} : \mathbb{R}^{m_2} \rightarrow L_2[0, h]^{p_1};$$

$$\hat{B}_1 \check{w}_k := \int_0^h \exp(A(h-\tau)) B_1 \check{w}_k(\tau) d\tau$$

$$(\hat{C}_1 \hat{x}_k)(\theta) := C_1 \exp(A\theta) \hat{x}_k$$

$$(\hat{D}_{11} \check{w}_k)(\theta) := D_{11} \check{w}_k(\theta) + \int_0^\theta C_1 \exp(A(\theta-\tau)) \check{w}_k(\tau) d\tau$$

$$(\hat{D}_{12} \hat{u}_k)(\theta) := (D_{12} + \int_0^\theta C_1 \exp(A(\theta-\tau)) B_2(\tau)) \hat{u}_k$$



$$\mathcal{P} : \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) = C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \\ y(t) = C_2 x(t) \end{cases}$$

$$x(t) \in \mathbb{R}^n, w(t) \in \mathbb{R}^{m_1}, u(t) \in \mathbb{R}^{m_2}$$

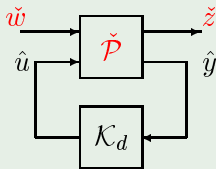
$$z(t) \in \mathbb{R}^{p_1}, y(t) \in \mathbb{R}^{p_2}$$

$$\mathcal{S} : \hat{y}_k := y(kh)$$

$$\mathcal{H} : u(t) := \hat{u}_k \text{ for } kh \leq t < (k+1)h$$

サンプル値制御系のリフティンク

Y.Yamamoto(1990), H.Toivonen(1992), B.Bamieh, J.Pearson(1992)



$$\check{w}_k \in L_2[0, h]^{m_1}, \quad \check{z}_k \in L_2[0, h]^{p_1}$$

$$\check{\mathcal{P}} : \begin{cases} \hat{x}_{k+1} = \hat{A} \hat{x}_k + \hat{B}_1 \check{w}_k + \hat{B}_2 \hat{u}_k \\ \check{z}_k = \hat{C}_1 \hat{x}_k + \hat{D}_{11} \check{w}_k + \hat{D}_{12} \hat{u}_k \\ \hat{y}_k = \hat{C}_2 \hat{x}_k \end{cases}$$

$$\hat{x}_k := x(kh) \in \mathbb{R}^n, \hat{u}_k \in \mathbb{R}^{m_2}, \hat{y}_k \in \mathbb{R}^{p_2}$$

$$\hat{A} := \exp(Ah), \quad \hat{B}_2 := \int_0^h \exp(A\tau) B_2 d\tau, \quad \hat{C}_2 := C_2$$

$$\check{B}_1 : L_2[0, h]^{m_1} \rightarrow \mathbb{R}^n;$$

$$\check{C}_1 : \mathbb{R}^n \rightarrow L_2[0, h]^{p_1};$$

$$\check{D}_{11} : L_2[0, h]^{m_1} \rightarrow L_2[0, h]^{p_1};$$

$$\check{D}_{12} : \mathbb{R}^{m_2} \rightarrow L_2[0, h]^{p_1};$$

$$\check{B}_1 \check{w}_k := \int_0^h \exp(A(h-\tau)) B_1 \check{w}_k(\tau) d\tau$$

$$(\check{C}_1 \hat{x}_k)(\theta) := C_1 \exp(A\theta) \hat{x}_k$$

$$(\check{D}_{11} \check{w}_k)(\theta) := D_{11} \check{w}_k(\theta) + \int_0^\theta C_1 \exp(A(\theta-\tau)) \check{w}_k(\tau) d\tau$$

$$(\check{D}_{12} \hat{u}_k)(\theta) := (D_{12} + \int_0^\theta C_1 \exp(A(\theta-\tau)) B_2(\tau) d\tau) \hat{u}_k$$

$$\begin{aligned} \check{B}_1 : L_2[0, h]^m &\rightarrow \mathbb{R}^n \\ \check{w} &\mapsto x := \check{B}_1 \check{w} \end{aligned}$$

$$\min_{\check{w}} \|\check{w}\|_{L_2[0, h]^m} \quad \text{s.t.} \quad x = \check{B}_1 \check{w}$$

これは有限時間最適制御問題であり、その最適解は

$$\check{w}_{opt} = \check{B}_1^* (\check{B}_1 \check{B}_1^*)^{-1} x$$

(注1) \check{B}_1^* は随伴写像 (注2) $\check{B}_1 \check{B}_1^* \in \mathbb{R}^{n \times n}$

(「 $\min_w \|w\|$ s.t. $x = Bw$ 、ただし $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $n < m$ 」の解は $w_{opt} = B^T (BB^T)^{-1} x$)

最悪外乱の特徴付け：連続時間外乱と離散時間外乱

連続時間最悪外乱 $\check{w}_{opt} = \check{B}_1^* (\check{B}_1 \check{B}_1^*)^{-1} x$ に対して、離散時間最悪外乱 \hat{w}_{opt} と係数行列 \hat{B}_1 を

$$\hat{w}_{opt} := (\check{B}_1 \check{B}_1^*)^{-1/2} x \in \mathbb{R}^n, \quad \hat{B}_1 := (\check{B}_1 \check{B}_1^*)^{1/2} \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

とすれば、 \check{w}_{opt} と \hat{w}_{opt} の状態への影響およびノルムは同じである。

$$\begin{aligned} \hat{B}_1 \hat{w}_{opt} &= x = \check{B}_1 \check{w}_{opt} \\ \|\hat{w}_{opt}\|_{\mathbb{R}^n}^2 &= x^T (\check{B}_1 \check{B}_1^*)^{-1} x = \|\check{w}_{opt}\|_{L_2[0, h]^m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \check{B}_1 : L_2[0, h]^m &\rightarrow \mathbb{R}^n \\ \check{w} &\mapsto x := \check{B}_1 \check{w} \end{aligned}$$

$$\min_{\check{w}} \|\check{w}\|_{L_2[0, h]^m} \quad \text{s.t.} \quad x = \check{B}_1 \check{w}$$

これは有限時間最適制御問題であり、その最適解は

$$\check{w}_{opt} = \check{B}_1^* (\check{B}_1 \check{B}_1^*)^{-1} x$$

(注1) \check{B}_1^* は随伴写像 (注2) $\check{B}_1 \check{B}_1^* \in \mathbb{R}^{n \times n}$

(「 $\min_w \|w\|$ s.t. $x = Bw$ 、ただし $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $n < m$ 」の解は $w_{opt} = B^T (BB^T)^{-1} x$)

最悪外乱の特徴付け：連続時間外乱と離散時間外乱

連続時間最悪外乱 $\check{w}_{opt} = \check{B}_1^* (\check{B}_1 \check{B}_1^*)^{-1} x$ に対して、離散時間最悪外乱 \hat{w}_{opt} と係数行列 \hat{B}_1 を

$$\hat{w}_{opt} := (\check{B}_1 \check{B}_1^*)^{-1/2} x \in \mathbb{R}^n, \quad \hat{B}_1 := (\check{B}_1 \check{B}_1^*)^{1/2} \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

とすれば、 \check{w}_{opt} と \hat{w}_{opt} の状態への影響およびノルムは同じである。

$$\begin{aligned} \hat{B}_1 \hat{w}_{opt} &= x = \check{B}_1 \check{w}_{opt} \\ \|\hat{w}_{opt}\|_{\mathbb{R}^n}^2 &= x^T (\check{B}_1 \check{B}_1^*)^{-1} x = \|\check{w}_{opt}\|_{L_2[0, h]^m}^2 \end{aligned}$$

① 動的システムの構造論 :

- 構造化システムの可制御性—非零要素間に線形従属がある場合
- 構造化システム、コンパートメントシステムの可同定性

② デジタル制御系の解析・設計論

- MIMO 系の極限零点
- サンプル値制御系の H_2, H_∞ 制御
- 周期制御系の Floquet 定理 (差分方程式版)

● 引用した論文の著者 (研究者)

- 構造可制御性での引用論文: R.Shields and J.Pearson, K.Glover and L.Silverman, E.Davison, H.Mayeda, J.Corfmat and A.Morse, B.Anderson
- 構造可同定性での引用文献: R.Bellman and K.Åström, K.Glover and J.Willems
- サンプル値系の極限零点の引用文献: K.Åström
- サンプル値系の H_∞ 制御での引用論文: B.Bamieh and J.Pearson, T.Chen and B.Franis, G.Dullerud and K.Glover, N.Sivashankar and P.Khargonekar, B.Anderson

● 螺旋階段的發展 ← フォーメーション制御と分散制御、ネットワーク制御でのグラフ理論

● Open Problems :

- 可同定性:パラメータ間に拘束がある場合
- 極限零点とインターラクタ の関係、入出力数や無限単因子次数の制約
- サンプル値制御系の周波数特性 (周波数分離は不成立) と感度関数の捉え方 (設計論)

① 動的システムの構造論 :

- 構造化システムの可制御性—非零要素間に線形従属がある場合
- 構造化システム、コンパートメントシステムの可同定性

② デジタル制御系の解析・設計論

- MIMO 系の極限零点
- サンプル値制御系の H_2, H_∞ 制御
- 周期制御系の Floquet 定理 (差分方程式版)

● 引用した論文の著者 (研究者)

- **構造可制御性**での引用論文: R.Shields and J.Pearson, K.Glover and L.Silverman, E.Davison, H.Mayeda, J.Corfmat and A.Morse, B.Anderson
- **構造可同定性**での引用文献: R.Bellman and K.Åström, K.Glover and J.Willems
- **サンプル値系の極限零点**の引用文献: K.Åström
- **サンプル値系の H_∞ 制御**での引用論文: B.Bamieh and J.Pearson, T.Chen and B.Fransis, G.Dullerud and K.Glover, N.Sivashankar and P.Khargonekar, B.Anderson

● 螺旋階段的發展 ← フォーメーション制御と分散制御、ネットワーク制御でのグラフ理論

● Open Problems :

- 可同定性:パラメータ間に拘束がある場合
- 極限零点とインターラクタ の関係、入出力数や無限単因子次数の制約
- サンプル値制御系の周波数特性 (周波数分離は不成立) と感度関数の捉え方 (設計論)

① 動的システムの構造論 :

- 構造化システムの可制御性—非零要素間に線形従属がある場合
- 構造化システム、コンパートメントシステムの可同定性

② デジタル制御系の解析・設計論

- MIMO 系の極限零点
- サンプル値制御系の H_2, H_∞ 制御
- 周期制御系の Floquet 定理 (差分方程式版)

● 引用した論文の著者 (研究者)

- **構造可制御性**での引用論文: R.Shields and J.Pearson, K.Glover and L.Silverman, E.Davison, H.Mayeda, J.Corfmat and A.Morse, B.Anderson
- **構造可同定性**での引用文献: R.Bellman and K.Åström, K.Glover and J.Willems
- **サンプル値系の極限零点**の引用文献: K.Åström
- **サンプル値系の H_∞ 制御**での引用論文: B.Bamieh and J.Pearson, T.Chen and B.Fransis, G.Dullerud and K.Glover, N.Sivashankar and P.Khargonekar, B.Anderson

● 螺旋階段的發展 ← フォーメーション制御と分散制御、ネットワーク制御でのグラフ理論

● Open Problems :

- 可同定性:パラメータ間に拘束がある場合
- 極限零点とインターラクタ の関係、入出力数や無限単因子次数の制約
- サンプル値制御系の周波数特性 (周波数分離は不成立) と感度関数の捉え方 (設計論)

① 動的システムの構造論 :

- 構造化システムの可制御性—非零要素間に線形従属がある場合
- 構造化システム、コンパートメントシステムの可同定性

② デジタル制御系の解析・設計論

- MIMO 系の極限零点
- サンプル値制御系の H_2, H_∞ 制御
- 周期制御系の Floquet 定理 (差分方程式版)

● 引用した論文の著者 (研究者)

- **構造可制御性**での引用論文: R.Shields and J.Pearson, K.Glover and L.Silverman, E.Davison, H.Mayeda, J.Corfmat and A.Morse, B.Anderson
- **構造可同定性**での引用文献: R.Bellman and K.Åström, K.Glover and J.Willems
- **サンプル値系の極限零点**の引用文献: K.Åström
- **サンプル値系の H_∞ 制御**での引用論文: B.Bamieh and J.Pearson, T.Chen and B.Fransis, G.Dullerud and K.Glover, N.Sivashankar and P.Khargonekar, B.Anderson

● 螺旋階段的発展 ← フォーメーション制御と分散制御、ネットワーク制御でのグラフ理論

● Open Problems :

- 可同定性:パラメータ間に拘束がある場合
- 極限零点とインターラクタの関係、入出力数や無限単因子次数の制約
- サンプル値制御系の周波数特性 (周波数分離は不成立) と感度関数の捉え方 (設計論)

② 研究雑感（初期の研究を振り返って）

- 線形システムの構造可制御
- サンプル値系の極限零点と H_∞ 制御
- 巨大吊り橋主塔の制振制御

① ロボット制御

産業用、マスタースレーブ、多指ハンド、卓球ロボット

② 制振制御

巨大吊り橋、セルフセンシング・アクチュエータ、エンジン振動

③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、…

マスタースレーブグリッパ

加藤典彦 助手（当時）

- 伝送遅れ
- 把持モデルと適応制御



マスタースレーブ
（多自由度・異構造）



多指ハンド

長瀬賢二 助手（当時）

中島明 助教（当時）

- 力覚・視覚フィードバック
- 安定把持、折り紙、毛筆

① ロボット制御

産業用、マスタースレーブ、多指ハンド、卓球ロボット

② 制振制御

巨大吊り橋、セルフセンシング・アクチュエータ、エンジン振動

③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、…



マスタースレーブグリッパ

加藤典彦 助手（当時）

- 伝送遅れ
- 把持モデルと適応制御



マスタースレーブ
（多自由度・異構造）



多指ハンド

長瀬賢二 助手（当時）

中島明 助教（当時）

- 力覚・視覚フィードバック
- 安定把持、折り紙、毛筆



① ロボット制御

産業用、マスタースレーブ、多指ハンド、卓球ロボット

② 制振制御

巨大吊り橋、セルフセンシング・アクチュエータ、エンジン振動

③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、…



マスタースレーブグリッパ

加藤典彦 助手(当時)

- 伝送遅れ
- 把持モデルと適応制御



マスタースレーブ
(多自由度・異構造)



多指ハンド

長瀬賢二 助手(当時)

中島明 助教(当時)

- 力覚・視覚フィードバック
- 安定把持、折り紙、毛筆



① ロボット制御

産業用、マスタースレーブ、多指ハンド、卓球ロボット

② 制振制御

巨大吊り橋、セルフセンシング・アクチュエータ、エンジン振動

③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、…

巨大吊り橋主塔の制振制御



<http://www.ne.jp/asahi/hokkaido/swanbay/gallery/view1/index.html>

プレジャーボートの位置・方位制御



<http://www.toyota.co.jp/marine/lineup/35/index.html>

① ロボット制御

産業用、マスタースレーブ、多指ハンド、卓球ロボット

② 制振制御

巨大吊り橋、セルフセンシング・アクチュエータ、エンジン振動

③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、…

プレジャーボートの位置・方位制御

(2005～2007)

藤本健治 准教授 (当時)

● バーチャルアンカーモード

船首を風や潮流の方向に向け、停船を保持

● バーチャルスパンカーモード

船首を風上に向けたまま、船体を望みの方向・速さで流す

● バーチャルコンパスモード

指定した方向に船首を保持し、船体を望みの方向・速さで流す

⇐ バーチャルアンカーシステム (TVAS)



<http://www.toyota.co.jp/marine/lineup/35/index.html>

① ロボット制御

産業用、マスタースレーブ、多指ハンド、卓球ロボット

② 制振制御

巨大吊り橋、セルフセンシング・アクチュエータ、エンジン振動

③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、...



巨大吊り橋主塔の制振制御

(1993 - 1998)



- 波動制御：長瀬賢二 助手 (当時)
- ピエゾ素子：大嶋和彦 助手 (当時)
- フレキシブルリンクロボット
： 尾形和哉 講師 (当時)

<http://www.ne.jp/asahi/hokkaido/swanbay/gallery/view1/index.html>

巨大吊り橋主塔の制振制御

全長：1,380m(=330+720+330)

主塔高：140m

桁下高：54.45m， 設計速度：60km/h

幅員：14.25m(2車線)

着工：1985年8月， 開通：1998年6月



白鳥大橋 (1999) @室蘭

<http://www.ne.jp/asahi/hokkaido/swanbay/gallery/view1/index.html>

全長：1,380m(=330+720+330)

主塔高：140m

桁下高：54.45m， 設計速度：60km/h

幅員：14.25m(2車線)

着工：1985年8月， 開通：1998年6月



白鳥大橋 (1999) @室蘭

<http://www.ne.jp/asahi/hokkaido/swanbay/gallery/view1/index.html>

(1) 主塔の建設



白鳥大橋 (1993.1)

巨大吊り橋主塔の制振制御

全長：1,380m(=330+720+330)

主塔高：140m

桁下高：54.45m， 設計速度：60km/h

幅員：14.25m(2車線)

着工：1985年8月， 開通：1998年6月



白鳥大橋 (1999) @室蘭

<http://www.ne.jp/asahi/hokkaido/swanbay/gallery/view1/index.html>

(2) メインロープ、ハンガーロープの建設

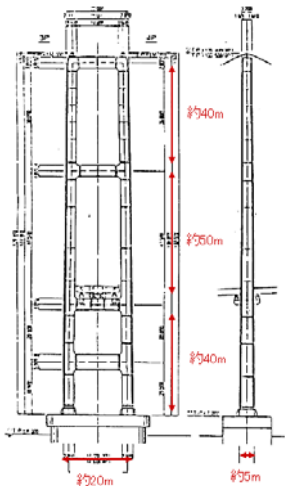


白鳥大橋 (NKK 提供)

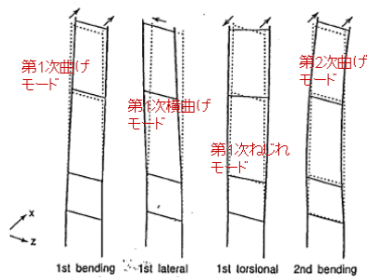
(1) 主塔の建設



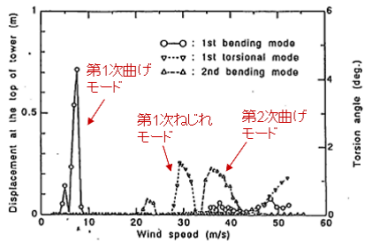
白鳥大橋 (1993.1)



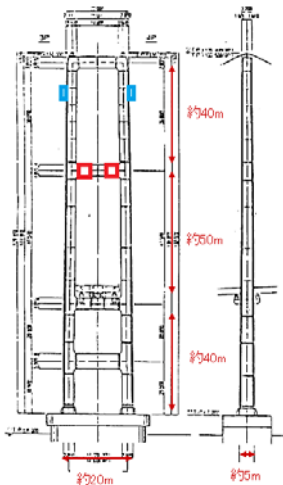
General View of Hakucho Bridge Tower



Typical Mode Shapes via FEM Analysis



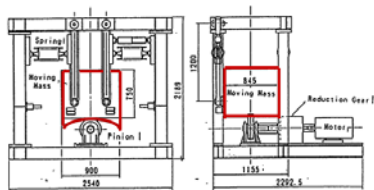
Vortex-induced Vibration of the Tower



General View of Hakucho Bridge Tower

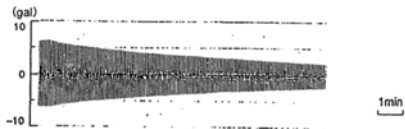
- センサ：速度計 (×2)
- アクチュエータ：AMD (×2)
(Active Mass Damper)

⇒ 曲げモードと捩れモードに対応

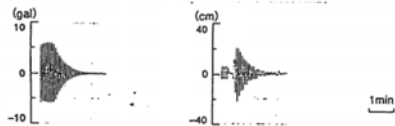


Motor Mass Unit of AMD System (4ton)

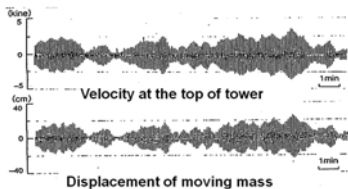
- コントローラ
 入力：塔頂速度 (×2) + AMD マス変位 (×2)
 出力：AMD 重り速度指令 (×2)
 (モータへの指令値)



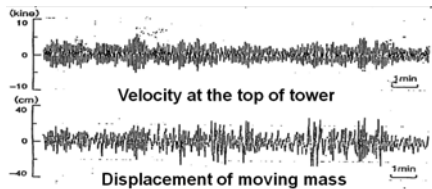
塔頂加速度 (自由減衰) $\text{gal}=\text{cm}/\text{s}^2$



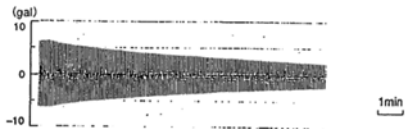
塔頂加速度 (DVFB) AMD マス変位



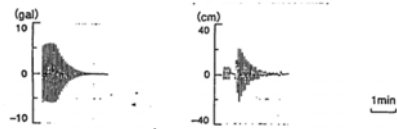
塔頂速度と AMD マス変位 (風速 7m/s) $\text{kine}=\text{cm}/\text{s}$



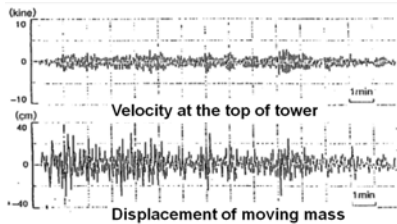
塔頂速度と AMD マス変位 (風速 15m/s 以上)



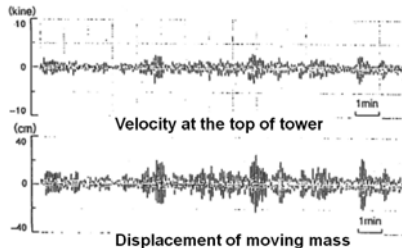
塔頂加速度 (自由減衰) $\text{gal} = \text{cm}/\text{s}^2$



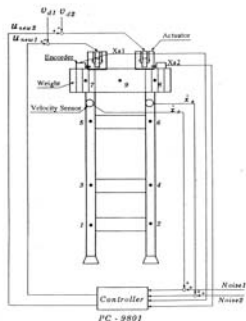
塔頂加速度 (DVFB) AMD マス変位



DVFB



H_∞



主塔模型 (NKK 所有)

主塔模型：

- 高さ 4.55m、幅 0.9m ⇐ 9 質点でモデル化
- 塔頂左右に制振用振子 (3kg, モータ駆動)
- 塔頂左右に速度センサ ⇐ 曲げと捻れ velocity 計測
- 塔頂と制振振子との相対位置計測エンコーダ
- 塔頂に ±48kg の重りを付加可能 ⇐ 建設途中を想定

制御仕様

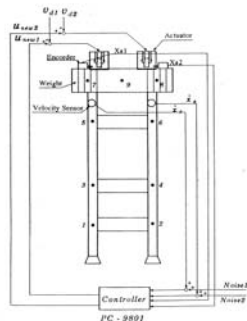
- 1 次の曲げ・捻れモードの振動低減 (20dB 程度)
- スピルオーバーによる不安定現象の回避
- 制振用振子のドリフトおよび過大な振れを防止
- 塔頂に付加される重りの増減によらず、制御性能を維持

制御系設計用モデルの考え方 (曲げ、捻れ)：

1 次モードの変化は **パラメータ変動**、2 次以上のモードは **非構造的モデル化誤差** として

$$G(s) = \frac{\bar{K}s}{s^2 + 2\bar{\zeta}\bar{\omega}s + \bar{\omega}^2} + W(s)\Delta(s)$$

$$\bar{\omega} \in \bar{\omega}_{nom}(1 + 0.06[-1, 1]), \bar{\zeta} \in \bar{\zeta}_{nom}(1 + 0.99[-1, 1]), \bar{K} \in \bar{K}_{nom}(1 + 0.5[-1, 1])$$



主塔模型 (NKK 所有)

主塔模型：

- 高さ 4.55m、幅 0.9m \Leftarrow 9 質点でモデル化
- 塔頂左右に制振用振子 (3kg, モータ駆動)
- 塔頂左右に速度センサ \Leftarrow 曲げと捻れ速度計測
- 塔頂と制振振子との相対位置計測エンコーダ
- 塔頂に $\pm 48\text{kg}$ の重りを付加可能 \Leftarrow 建設途中を想定

制御仕様

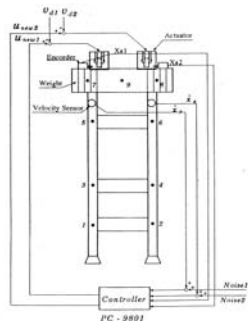
- 1 次の曲げ・捻れモードの振動低減 (20dB 程度)
- スピルオーバーによる不安定現象の回避
- 制振用振子のドリフトおよび過大な振れを防止
- 塔頂に付加される重りの増減によらず、制御性能を維持

制御系設計用モデルの考え方 (曲げ、捻れ)：

1 次モードの変化は **パラメータ変動**、2 次以上のモードは **非構造的モデル化誤差** として

$$G(s) = \frac{\bar{K}s}{s^2 + 2\bar{\zeta}\bar{\omega}s + \bar{\omega}^2} + W(s)\Delta(s)$$

$$\bar{\omega} \in \bar{\omega}_{nom}(1 + 0.06[-1, 1]), \bar{\zeta} \in \bar{\zeta}_{nom}(1 + 0.99[-1, 1]), \bar{K} \in \bar{K}_{nom}(1 + 0.5[-1, 1])$$



主塔模型 (NKK 所有)

主塔模型:

- 高さ 4.55m、幅 0.9m \Leftarrow 9 質点でモデル化
- 塔頂左右に制振用振子 (3kg, モータ駆動)
- 塔頂左右に速度センサ \Leftarrow 曲げと捻れ velocity 計測
- 塔頂と制振振子との相対位置計測エンコーダ
- 塔頂に $\pm 48\text{kg}$ の重りを付加可能 \Leftarrow 建設途中を想定

制御仕様

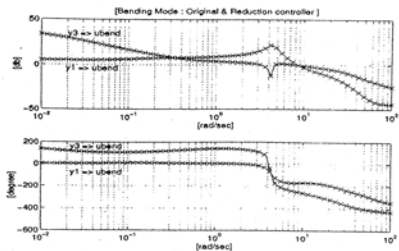
- 1 次の曲げ・捻れモードの振動低減 (20dB 程度)
- スピルオーバーによる不安定現象の回避
- 制振用振子のドリフトおよび過大な振れを防止
- 塔頂に付加される重りの増減によらず、制御性能を維持

制御系設計用モデルの考え方 (曲げ、捻れ):

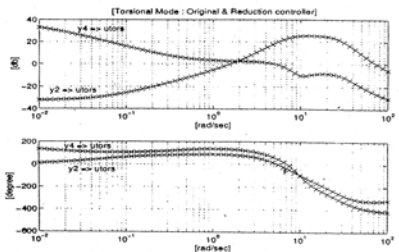
1 次モードの変化は **パラメータ変動**、2 次以上のモードは **非構造的モデル化誤差** として

$$G(s) = \frac{\bar{K}s}{s^2 + 2\bar{\zeta}\bar{\omega}s + \bar{\omega}^2} + W(s)\Delta(s)$$

$$\bar{\omega} \in \bar{\omega}_{nom}(1 + 0.06[-1, 1]), \bar{\zeta} \in \bar{\zeta}_{nom}(1 + 0.99[-1, 1]), \bar{K} \in \bar{K}_{nom}(1 + 0.5[-1, 1])$$

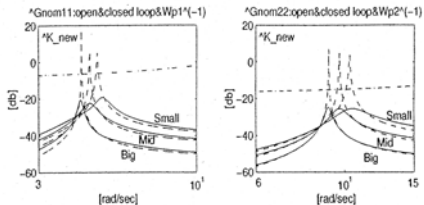


(a) Bending mode



(b) Torsional mode

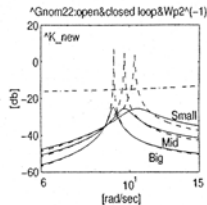
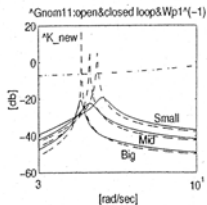
μ コントローラ



閉ループ特性

	荷重 (rad/s)	Peak Gain 減少幅 (dB)	Damping Ratio ($\times 10^{-2}$)
曲げ	S(4.70)	24.10	5.18
	M(4.43)	28.34	4.92
	B(4.16)	44.23	1.55
振り	S(10.34)	28.98	8.45
	M(9.75)	30.24	4.31
	B(9.15)	51.79	1.64

長瀬・早川, 機論 C, 1997



閉ループ特性

研究室で作成した小型主塔模型（曲げモードのみ）

	荷重 (rad/s)	Peak Gain 減少幅 (dB)	Damping Ratio ($\times 10^{-2}$)
曲げ	S(4.70)	24.10	5.18
	M(4.43)	28.34	4.92
	B(4.16)	44.23	1.55
振り	S(10.34)	28.98	8.45
	M(9.75)	30.24	4.31
	B(9.15)	51.79	1.64

長瀬・早川, 機論 C, 1997

混合感度問題、ループ整形法
 μ シンセシス
 ゲインスケジュール H_∞ 制御

① ロボット制御

産業用、マスタースレーブ、多指ハンド、卓球ロボット

② 制振制御

巨大吊り橋、セルフセンシング・アクチュエータ、エンジン振動

③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、…

● モデルベースアプローチの考え方を大事にしてきた（つもり）

● 制御対象の物理モデル

⇒ 達成できる制御性能の限界

⇒ 合理的なコントローラ的设计

● ロボット制御では、

外界センサ（力覚、触覚、視覚、…）からの情報抽出と的確な目標値生成

● 多自由度ロボット、環境との干渉、エンジン制御など：大規模、複雑、非線形

⇒ 機械学習、ディープラーニングに代表される **データベースアプローチ**との融合

⇒ 学習の後、**"法則"**が生成できるか？

① ロボット制御

産業用、マスタースレーブ、多指ハンド、卓球ロボット

② 制振制御

巨大吊り橋、セルフセンシング・アクチュエータ、エンジン振動

③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、…

● モデルベースアプローチの考え方を大事にしてきた（つもり）

● 制御対象の物理モデル

⇒ 達成できる制御性能の限界

⇒ 合理的なコントローラ的设计

● ロボット制御では、

外界センサ（力覚、触覚、視覚、…）からの情報抽出と的確な目標値生成

● 多自由度ロボット、環境との干渉、エンジン制御など：大規模、複雑、非線形

⇒ 機械学習、ディープラーニングに代表される **データベースアプローチ**との融合

⇒ 学習の後、**"法則"**が生成できるか？

① ロボット制御

産業用、マスタースレーブ、多指ハンド、卓球ロボット

② 制振制御

巨大吊り橋、セルフセンシング・アクチュエータ、エンジン振動

③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、…

● モデルベースアプローチの考え方を大事にしてきた（つもり）

● 制御対象の物理モデル

⇒ 達成できる制御性能の限界

⇒ 合理的なコントローラ的设计

● ロボット制御では、

外界センサ（力覚、触覚、視覚、…）からの情報抽出と的確な目標値生成

● 多自由度ロボット、環境との干渉、エンジン制御など：大規模、複雑、非線形

⇒ 機械学習、ディープラーニングに代表される **データベースアプローチ**との融合

⇒ 学習の後、"**法則**"が生成できるか？

- ① はじめに
- ② 研究雑感 (初期の研究をふりかえって)
 - 線形システムの構造可制御
 - サンプル値系の極限零点と H_∞ 制御
 - 巨大吊り橋主塔の制振制御
- ③ おわりに

- システム制御理論

- ① 動的システムの構造論
- ② デジタル制御系の解析・設計論

- 制御応用

- ① ロボット制御
- ② 制振制御
- ③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、…

- "制御"は概念指向型 (Concept-oriented) ⇔ 目的指向型 (Object-oriented)
- 工学の多くが目的指向 (Goal-oriented) ⇔ "制御"は方法論の研究
 - ⇒ 対象を"動的システム"として一般化 (強みであり弱み)
 - ⇒ 制御法と制御対象の相性

- システム制御理論

- ① 動的システムの構造論
- ② デジタル制御系の解析・設計論

- 制御応用

- ① ロボット制御
- ② 制振制御
- ③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、…

- "制御"は概念指向型 (Concept-oriented) ⇔ 目的指向型 (Object-oriented)

- 工学の多くが目的指向 (Goal-oriented) ⇔ "制御"は方法論の研究

⇒ 対象を"動的システム"として一般化 (強みであり弱み)

⇒ 制御法と制御対象の相性

- システム制御理論
 - ① 動的システムの構造論
 - ② デジタル制御系の解析・設計論

- 制御応用
 - ① ロボット制御
 - ② 制振制御
 - ③ 車両運動、エンジン制御、船舶位置・方位制御、…

- "制御"は概念指向型 (Concept-oriented) ⇔ 目的指向型 (Object-oriented)
- 工学の多くが目的指向 (Goal-oriented) ⇔ "制御"は方法論の研究
 - ⇒ 対象を"動的システム"として一般化 (強みであり弱み)
 - ⇒ 制御法と制御対象の相性

● 研究雑感：

- 本質を見抜く 直感 とそれを確証に繋げる ねばり強さ
⇐ "本質"はシンプルで美しい。 / 実験観測は本質を巧妙に隠す。
- 夢中に集中 (四六時中頭から離れない)
アナロジー (類似付け) から、意外なヒントが生まれる
- 「知の創造」と「社会的価値の創出」の好循環 ⇐ 大学と社会との関わり
"人類・社会に役立つ"の危うさ ⇐ 多面的視点、謙虚さ

● 教育雑感：

- 基礎知識と論理的思考の大切さ
- 結果に結びついた思考 (過程) の説明
- 価値観・人生観を育む (お手伝い)
"太った豚になるより、やせたアルキメデスになれ"(大河内一男、ジョン・スチュアート・ミル「功利主義論」)

● 研究雑感：

- 本質を見抜く 直感 とそれを確証に繋げる ねばり強さ
⇐ "本質"はシンプルで美しい。 / 実験観測は本質を巧妙に隠す。
- 夢中に集中 (四六時中頭から離れない)
アナロジー (類似付け) から、意外なヒントが生まれる
- 「知の創造」と「社会的価値の創出」の好循環 ⇐ 大学と社会との関わり
"人類・社会に役立つ"の危うさ ⇐ 多面的視点、謙虚さ

● 教育雑感：

- 基礎知識と論理的思考の大切さ
- 結果に結びついた思考 (過程) の説明
- 価値観・人生観を育む (お手伝い)
"太った豚になるより、やせたアルキメデスになれ"(大河内一男、ジョン・スチュアート・ミル「功利主義論」)

● 研究雑感：

- 本質を見抜く 直感 とそれを確証に繋げる ねばり強さ
⇐ "本質"はシンプルで美しい。 / 実験観測は本質を巧妙に隠す。
- 夢中に集中 (四六時中頭から離れない)
アナロジー (類似付け) から、意外なヒントが生まれる
- 「知の創造」と「社会的価値の創出」の好循環 ⇐ 大学と社会との関わり
"人類・社会に役立つ"の危うさ ⇐ 多面的視点、謙虚さ

● 教育雑感：

- 基礎知識と論理的思考の大切さ
- 結果に結びついた思考 (過程) の説明
- 価値観・人生観を育む (お手伝い)
"太った豚になるより、やせたアルキメデスになれ"(大河内一男、ジョン・スチュアート・ミル「功利主義論」)

● 研究雑感：

- 本質を見抜く 直感 とそれを確証に繋げる ねばり強さ
⇐ "本質"はシンプルで美しい。 / 実験観測は本質を巧妙に隠す。
- 夢中に集中 (四六時中頭から離れない)
アナロジー (類似付け) から、意外なヒントが生まれる
- 「知の創造」と「社会的価値の創出」の好循環 ⇐ 大学と社会との関わり
"人類・社会に役立つ"の危うさ ⇐ 多面的視点、謙虚さ

● 教育雑感：

- 基礎知識と論理的思考の大切さ
- 結果に結びついた思考 (過程) の説明
- 価値観・人生観を育む (お手伝い)

"太った豚になるより、やせたアルキメデスになれ"(大河内一男、ジョン・スチュアート・ミル「功利主義論」)

● 研究雑感：

- 本質を見抜く 直感 とそれを確証に繋げる ねばり強さ
⇐ "本質"はシンプルで美しい。 / 実験観測は本質を巧妙に隠す。
- 夢中に集中 (四六時中頭から離れない)
アナロジー (類似付け) から、意外なヒントが生まれる
- 「知の創造」と「社会的価値の創出」の好循環 ⇐ 大学と社会との関わり
"人類・社会に役立つ"の危うさ ⇐ 多面的視点、謙虚さ

● 教育雑感：

- 基礎知識と論理的思考の大切さ
- 結果に結びついた思考 (過程) の説明
- 価値観・人生観を育む (お手伝い)

"太った豚になるより、やせたアルキメデスになれ"(大河内一男、ジョン・スチュアート・ミル「功利主義論」)

● 研究雑感：

- 本質を見抜く 直感 とそれを確証に繋げる ねばり強さ
⇐ "本質"はシンプルで美しい。 / 実験観測は本質を巧妙に隠す。
- 夢中に集中 (四六時中頭から離れない)
アナロジー (類似付け) から、意外なヒントが生まれる
- 「知の創造」と「社会的価値の創出」の好循環 ⇐ 大学と社会との関わり
"人類・社会に役立つ"の危うさ ⇐ 多面的視点、謙虚さ

● 教育雑感：

- 基礎知識と論理的思考の大切さ
- 結果に結びついた思考 (過程) の説明
- 価値観・人生観を育む (お手伝い)
"太った豚になるより、やせたアルキメデスになれ"(大河内一男、ジョン・スチュアート・ミル「功利主義論」)

大学教育研究への期待

- 第5期（H28～32年度）科学技術基本計画（2016年1月22日閣議決定）
 - グローバルな環境/人々の関心が「もの」から「コト」へ
 - 施策の4本柱
 - ① 未来の産業創造・社会変革に向けた新たな価値創出の取組
超スマート社会 ⇐ ロボット技術、センサー技術、アクチュエータ技術、バイオテクノロジー、ヒューマンインターフェース技術、素材・ナノテクノロジー
 - ② 経済・社会的な課題への対応
 - ③ 科学技術イノベーションの基盤的な力の強化
 - ④ イノベーション創出に向けた人材、知、資金の好循環システムの構築
- 情報通信技術（ICT）の急激な進化の中での機械学、情報学、システム制御学：
Industry 4.0 や IoT(Internet of Things) とのかかわり

お世話になった方々(敬称略)

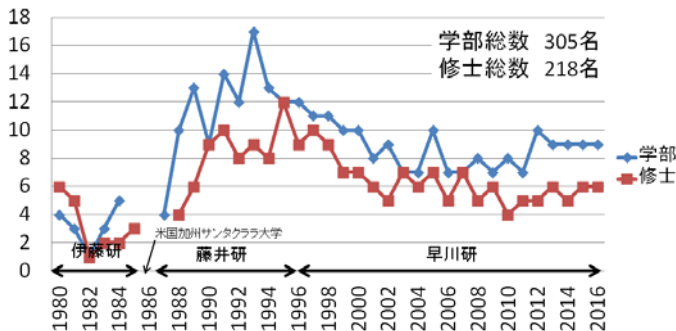
- **材料力学講座**: 大橋義夫、戸伏壽昭
- **自動制御研究施設・伊藤研究室**
伊藤正美、細江繁幸、伊藤宏司、河野通夫、稲垣恵子(旧姓:羽田野)
- **自動制御研究施設・中村研究室**: 中村嘉平、松尾強、舟橋康行
- **航空教室の制御講座**
早勢実、鈴木正之、丹羽昌平、安藤嘉則、杉本謙二、坂本登、穂高一条、軸屋一郎
- **藤井研究室**: 藤井省三、野村由司彦、渡辺崇、加藤典彦、大嶋和彦
- **早川研究室**: 尾形和哉、長瀬賢二、藤本健治、中島明、浅井徹、有泉亮、森本絵里、北村ルミ、加藤敦子、近藤華子
- **研究室で一緒に過ごした学生さんたち** (305名 + 218名)

お世話になった方々(敬称略)

- **材料力学講座**: 大橋義夫、戸伏壽昭
- **自動制御研究施設・伊藤研究室**
伊藤正美、細江繁幸、伊藤宏司、河野通夫、稲垣恵子(旧姓:羽田野)
- **自動制御研究施設・中村研究室**: 中村嘉平、松尾強、舟橋康行
- **航空教室の制御講座**
早勢実、鈴木正之、丹羽昌平、安藤嘉則、杉本謙二、坂本登、穂高一条、軸屋一郎
- **藤井研究室**: 藤井省三、野村由司彦、渡辺崇、加藤典彦、大嶋和彦
- **早川研究室**: 尾形和哉、長瀬賢二、藤本健治、中島明、浅井徹、有泉亮、森本絵里、北村ルミ、加藤敦子、近藤華子
- **研究室で一緒に過ごした学生さんたち** (305名 + 218名)

お世話になった方々(敬称略)

- **材料力学講座**: 大橋義夫、戸伏壽昭
- **自動制御研究施設・伊藤研究室**
伊藤正美、細江繁幸、伊藤宏司、河野通夫、稲垣恵子(旧姓:羽田野)
- **自動制御研究施設・中村研究室**: 中村嘉平、松尾強、舟橋康行
- **航空教室の制御講座**
早勢実、鈴木正之、丹羽昌平、安藤嘉則、杉本謙二、坂本登、穂高一条、軸屋一郎
- **藤井研究室**: 藤井省三、野村由司彦、渡辺崇、加藤典彦、大嶋和彦
- **早川研究室**: 尾形和哉、長瀬賢二、藤本健治、中島明、浅井徹、有泉亮、森本絵里、北村ルミ、加藤敦子、近藤華子
- **研究室で一緒に過ごした学生さんたち** (305名 + 218名)



研究室で修了された工学博士・博士（工学）の皆さん（敬称略）

- 1 杜宏業 (1992) 分散制御系の安定化に関する研究【主査：藤井】
- 2 尾形和哉 (1993) 制御対象の種々のモデルに対する一般化予測制御の研究【主査：藤井】
- 3 長瀬賢二 (1998) : 柔軟構造物のロバストな制振制御
- 4 瀧上唯夫 (1999) : ピエゾ素子を用いたセルフセンシング・アクチュエータの応用に関する研究【大嶋】
- 5 佐野滋則 (2000) : 不確かさを考慮したパラメータ同定に関する研究【尾形】
- 6 Yingjie YIN(2001) : Robust Control for Robot manipulators
- 7 Hirotaka OJIMA(2004) : Wave Control of Uncertainty Varying Damped Mass-Spring Systems【長瀬】
- 8 高木賢太郎 (2004) : 圧電素子を用いた柔軟構造物のシャントダンピングと振動モード推定法に関する研究【大嶋】
- 9 Akira NAKASHIMA(2005) : Control for Robot Fingers with Nonholonomic Constraints【長瀬】
- 10 Xu Bo(2005) : Modeling and composite control of flexible link manipulators【航空・鈴木研】
- 11 菅原佳城 (2005) : 2リンクフレキシブルマニピュレータの入力整形とエネルギー修正法に関する研究【尾形】
- 12 田代勉 (2007) : ファンクショナルアーキテクチャに基づく自動車の路面反力安定化制御【細江研】
- 13 福永修一 (2008) : 機械学習のアプローチによる状態空間モデルの推定【主査：藤本】
- 14 日比野良一 (2009) : AT ロックアップクラッチ制御系のロバスト制御と設計負荷低減に関する研究【論文】
- 15 Tomohiko JIMBO(2010) : Physical Model-based Control Design Methods for Automotive Engines
- 16 Satoshi SATOH(2010) : Control of Deterministic and Stochastic Hamiltonian Systems【主査：藤本】
- 17 Chunfang LIU(2013): Racket Control and Spinning measurement for Table Tennis Robots
- 18 Zhiwei HAO(2014) : Optimal Trajectory Generation via Double Generating Functions and Application to Biped Robots【藤本】
- 19 伊藤章 (2016) : 車両に潜在する冗長性を活用した耐故障制御系設計に関する研究

卒業生の皆さんへ

4系、工学研究科、そして名古屋大学の
教員、職員の皆様へ

研究室を支えてくださった多くの企業の皆様へ

学会活動でお世話になった多くの皆様へ

心より御礼申し上げます

