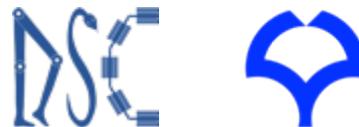


ロボット制御学における “そもそも”のすゝめ

大阪大学 大須賀公一

主な登場人物

府大：木村哲也, 林良太, 衣笠哲也,
京大：桐原謙一, 猿田吉秀, 杉本靖博,
神大：赤澤智昭, 中谷和弘, 吉岡秀隆,
阪大：末岡裕一郎, 中西大輔, 木林傑,
大人：石川将人, 石黒章夫, 鄭心知, 大脇大



Dynamical Systems Control
Osaka University, Japan

SICEらん「そもそものすゝめ」.

大須賀公一「そもそものススメ」

計測と制御

Vol.30, No.5, p.456,1991

・ ・ そもそも？

◇ “そもそも” のススメ

「現在の科学技術の発展には目ざましいものがあり…」とは、どこかの教科書にでもでてきそうなフレーズである。今日では、当り前すぎてかえってインパクトが薄いくらいではあるが、確かにその通りだと思う。まず身の回りを視てみると、家電製品、自動車、パソコンなど、いわゆる“ハイテク”のかたまりのような製品があふれかえっている。また、現在私自身が興味のある工学の世界でも例外ではなく、つぎつぎと新しい理論や方式の開発が進められている。おそらく悪いことではないのであろう。

しかしながら、なかには「これのもともとの目的は何でしたっけ?」と言いたくなるような“新方式や新製品”もあるようにも思える。

このように、物事が進んでくると、つい、いわゆる“木の枝”を延ばすことが大きな目標になってしまい、なぜその枝を延ばす必要があったのか、ということ忘れてしまうことがある。あるいは、別の言い方をすると手段と目的がいつのまにかすりかわってしまう。

ということで、“そもそものススメ”なのである。例えば“そもそも洗濯機は何のために作ろうとしたのだったろうか?”とか、“そもそもロボットとは何なんだ?”あるいは、“そもそも制御とは?”などなど…。

すなわち、このへんでちょっと立ち止まって、“そもそも今やっていることの目的は何だったかな?”と問いかけてみてはどうでしょうか、というススメなのである。

そうすると、思わぬところに先陣達が見落としたダイヤモンドが落ちているかもしれない…

(大須賀 公一)

SICEらん「そもそものすゝめ」.

野原があった。そこへ一匹の子牛がやってきた。
子牛は気まぐれに、くねくね曲がりながらその野原を
通って行った。

その翌日、狩人におわれた鹿がやってきた。
鹿は子牛の通った、草がねている後を逃げていった。
----緊急の時は、創造している暇はない。人の通った後を通る
ものだ。---狩人もそこを通って追って行った。

草はますますふみつけられ、はっきりと曲がった道ができた。
その次の日は羊がやってきた。
羊は、その曲がりくねった小道を、曲がりくねっていると
不平を言いながら通っていった。

SICEらん「そもそものすゝめ」.

しばらくたって、今度は旅人が来た。旅人もその曲がりくねった道を通っていった。

こうして、草はとれ、土面が顔を出し、曲がりくねった小道ができあがった。こうなると、村人も、旅人も、馬車も、犬も、そこを通る。

月日は矢のように過ぎ、その曲がりくねった小道は大通りになった。村の家々は、その大通りに沿って曲がりくねって建てられていった。またたくうちに、そこは大都会の中心街となった。

SICEらん「そもそものすゝめ」.

鉄道が敷かれたが、その線路も道に沿って曲がっていた。

何十万人もの人々が、今もなお、三百年の昔に通った、あの子牛に導かれて、くねくね曲がりながら通ってゆく。

確固たる前例なるものは、こんなにまでも尊ばれるのだ。

サム・ウォルター・フォスの「子牛の通った小道」



森政弘先生
“「非まじめ」のすすめ”より
(1984)

目次

横井さんからのお題

ROBOMECH89発表タイトル

大須賀，小野：メカニカルシステムのPD型二重構造ロバスト制御から25年たって、ロボット制御は、どう変遷して何ができるようになって、何がまだできないのかそれはなぜなのか、というようなお話をいただければと思います。

「自己の内に他を見，他の内に自己を見る」

—内即外・外即内—

(西田幾多郎)

- 流れ1 基礎：モデルベースト制御
- 流れ2 徴候：ダイナミクスベースト制御
- 流れ3 漸悟：陰的制御と陽的制御
- 流れ4 総括：お題への回答

目次

横井さんからのお題

ROBOMECH89発表タイトル

大須賀，小野：メカニカルシステムのPD型二重構造ロバスト制御から25年たって、ロボット制御は、どう変遷して何ができるようになって、何がまだできないのかそれはなぜなのか、というようなお話をいただければと思います。

「自己の内に他を見，他の内に自己を見る」

—内即外・外即内—

(西田幾多郎)

- 流れ1 基礎：モデルベースト制御
- 流れ2 徴候：ダイナミクスベースト制御
- 流れ3 漸悟：陰的制御と陽的制御
- 流れ4 総括：お題への回答

流れ1 基礎：モデルベースド制御

モデリングと制御

先端的なモデリング論によるモデリングと先端制御理論

モデリング：非線形システムのパラメータ同定
(1982-) 非線形システムの線形モデル集合同定

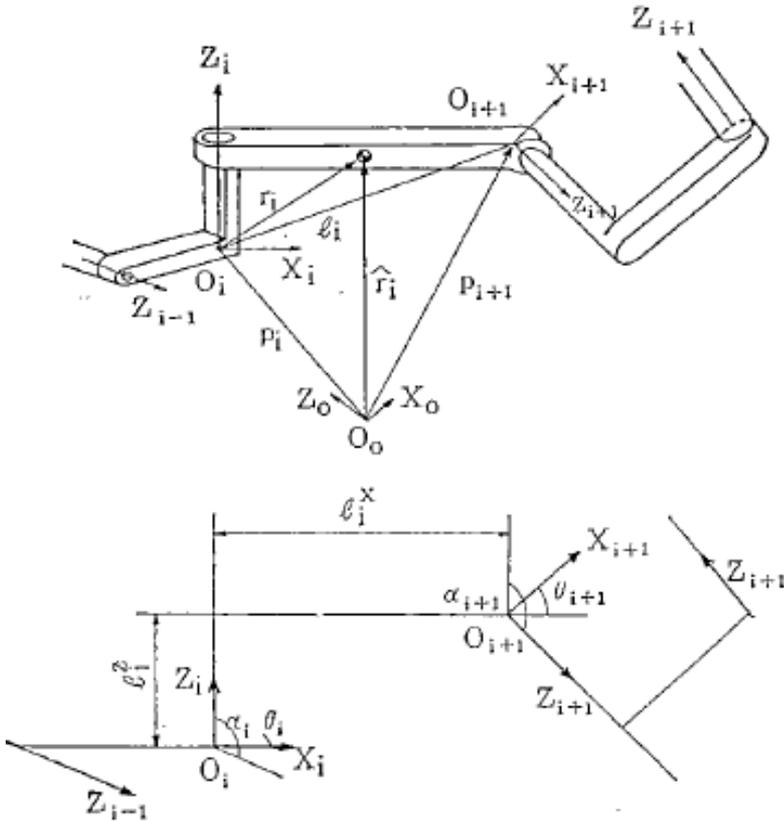
制御理論：非線形適応制御
(1984-) 非線形ロバスト制御
非線形ゲインスケジューリング制御
 H_∞ 制御
二次安定化制御
：

メカニカルシステムを想定

流れ1 基礎：モデルベースド制御

モデリング

マニピュレータの基底パラメータ・同定・仮想パラメータ



一部分

$$\sum_{j=1}^n M(i, j) \ddot{\theta}_j + J a_i \ddot{\theta}_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left\{ \frac{\partial M(i, j)}{\partial \theta_k} - \frac{\partial M(j, k)}{2 \partial \theta_i} \right\} \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k + B_i \dot{\theta}_i - g_0^T W_i D H_i + f c_i \operatorname{sgn} \dot{\theta}_i = \tau_i \quad (1 \leq i \leq n) \quad (9-a)$$

ただし, $M(j, k) = M(k, j)$ であり,

$$M(j, k) = \bar{J}(j, k) + \bar{R}(j, k) \quad (j \geq k) \quad (9-b)$$

$$\bar{J}(j, k) = \sum_{s=j}^n e_z^T W_{js} \bar{J}_s W_{ks}^T e_z \quad (9-c)$$

$$\begin{aligned} \bar{R}(j, k) = & \sum_{v=j}^{n-1} l_v^T W_{jv}^T D^T W_{kv}^T D W_{kv+1} H_{v+1} \\ & + \sum_{v=j}^{n-1} l_v^T W_{kv}^T D^T W_{kj} D W_{jv+1} H_{v+1} \\ & + \sum_{v=k}^{j-1} l_v^T W_{kv}^T D^T W_{kj} D H_j \end{aligned} \quad (9-d)$$

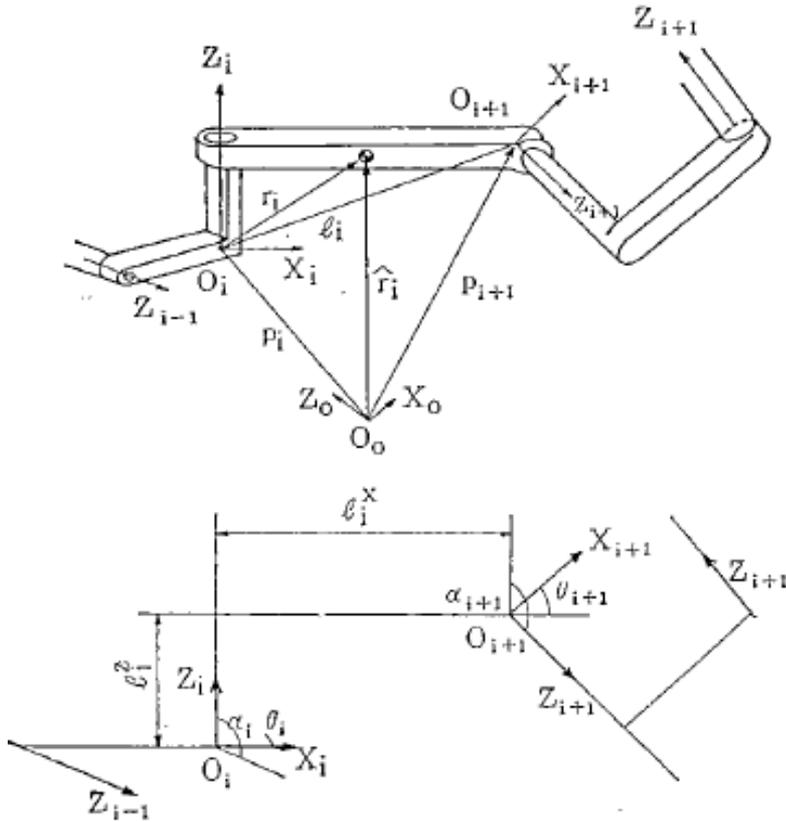
$$H_{v+1} = \sum_{s=v+1}^{r(v+2)-1} W_{v+1s} \bar{R}_s + \sum_{s=r(v+2)}^n W_{v+1s} R_s \quad (9-e)$$

nリンクマニピュレータの完全運動方程式(1985)

流れ1 基礎：モデルベースド制御

モデリング

マニピュレータの基底パラメータ・同定・仮想パラメータ



《命題1》 P/P型マニピュレータの動特性モデルは、以下に示されるパラメータ（結合パラメータと呼ぶ）が同定されれば、得られる。ただし、関節配置は(10)式のとおりとし、 $l_i (1 \leq i \leq n)$ は既知とする。

$$(i) \quad \eta^{z_i} = \begin{cases} \bar{J}^{z_i} + \delta_i(1, P_1) J a_{p1} (P_e \leq i \leq P_{e+1} - 2) \\ \bar{J}^{z_i} + \sum_{s=i+1}^{P_{e+1}-1} \bar{J}^{y_s} & (i = P_{e+1} - 1) \end{cases} \quad (11-a)$$

$$\gamma^{x_i} = R^{x_i} \quad (P_e \leq i \leq P_{e+1} - 1) \quad (11-b)$$

$$\gamma^{y_i} = \begin{cases} R^{y_i} & (P_e \leq i \leq P_{e+1} - 2) \\ R^{y_i} - \sum_{s=i+1}^{P_{e+1}-1} R^{z_s} & (i = P_{e+1} - 1) \end{cases} \quad (11-c)$$

ただし、 $0 \leq e \leq h, i \neq P_0$ とし、 $\delta_i(1, P_1)$ は $i=1, P_1$ の時1をとり、それ以外では0となる関数とする。また、 $\alpha_1=0$ の時は $\gamma^{x_1}, \gamma^{y_1}$ は必要ない。

$$(ii) \quad \eta^{x_i} = \begin{cases} \bar{J}^{x_i} - \bar{J}^{y_i} & (P_e \leq i \leq P_{e+1} - 2) \\ \bar{J}^{x_i} - \bar{J}^{y_i} + \sum_{s=i+1}^{P_{e+1}-1} \bar{J}^{y_s} & (i = P_{e+1} - 1) \end{cases} \quad (11-d)$$

一部分

nリンクマニピュレータの完全運動方程式(1985)

流れ1 基礎：モデルベースド制御

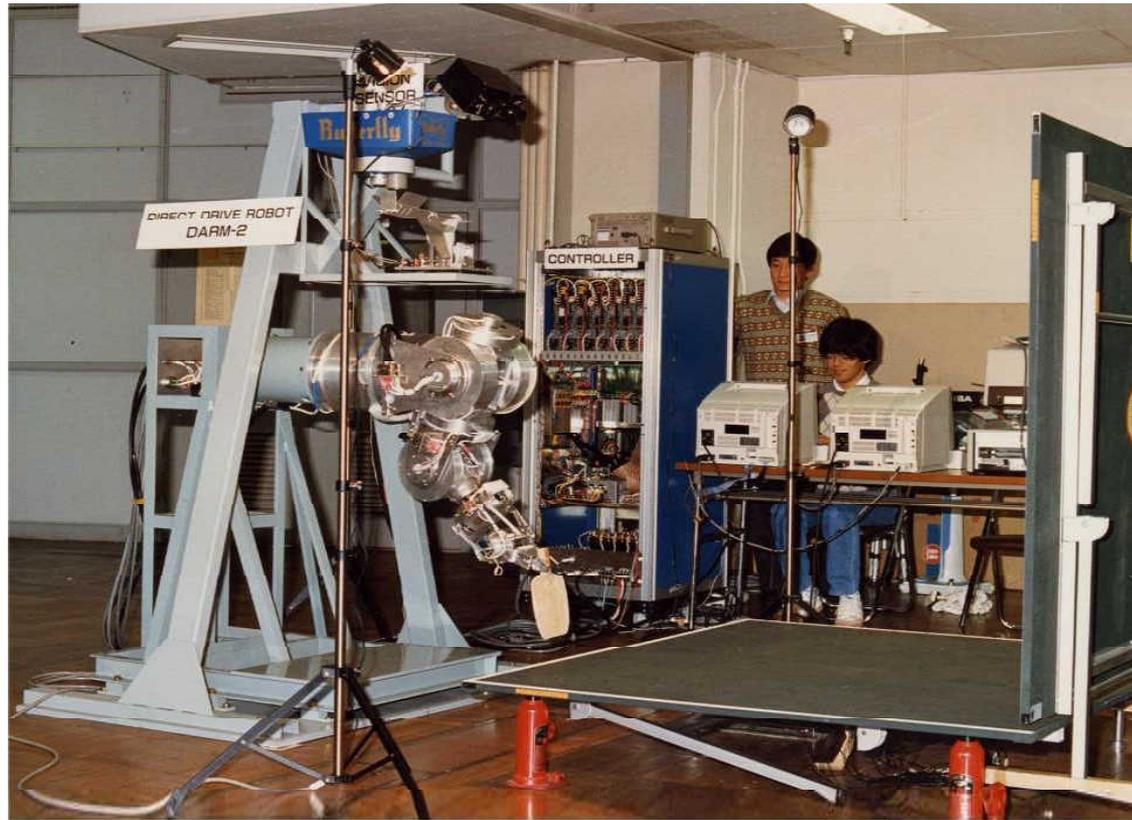
制御理論

新しい制御理論の構築とそのロボットへの適用・展開

- 非線形システム
- 非線形構造既知
- パラメータ未知



非線形適応制御
(線形近似無し!)

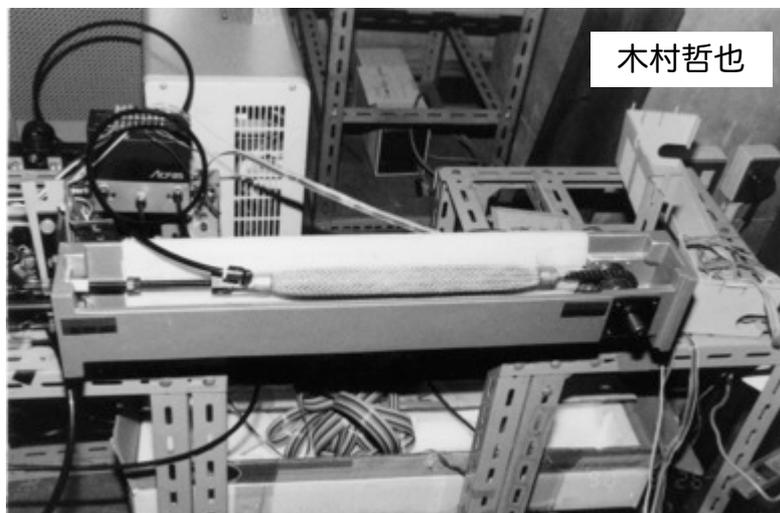


DARM-II(1986)(東芝)

流れ1 基礎：モデルベースド制御

制御理論

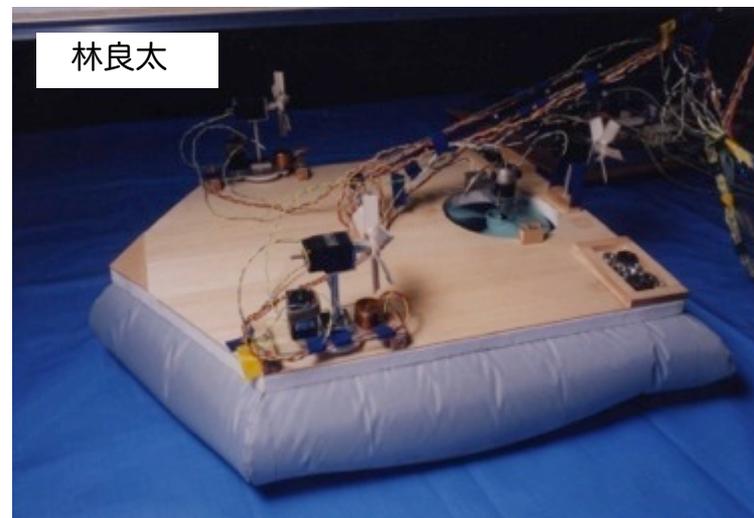
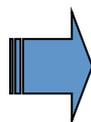
新しい制御理論の構築とそのロボットへの適用・展開



木村哲也

ラバチュエータ(1990)

- ・空気／流体特性
- ・非線形特性
- ・非構造的な不確かさ



林良太

ホバークラフト模型(1991-1995)

- ・ H_∞ 制御理論
- ・非線形制御

流れ1 基礎：モデルベースド制御

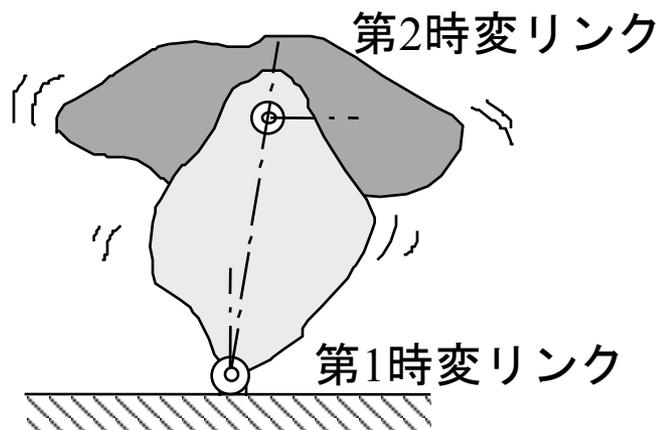
制御理論

新しい制御理論の構築とそのロボットへの適用・展開

脚ロボット Emu → 非線形ゲインスケジューリング制御(1997)

- ・劣駆動系
- ・非線形特性（多リンク系）
- ・時変特性（屈伸運動）

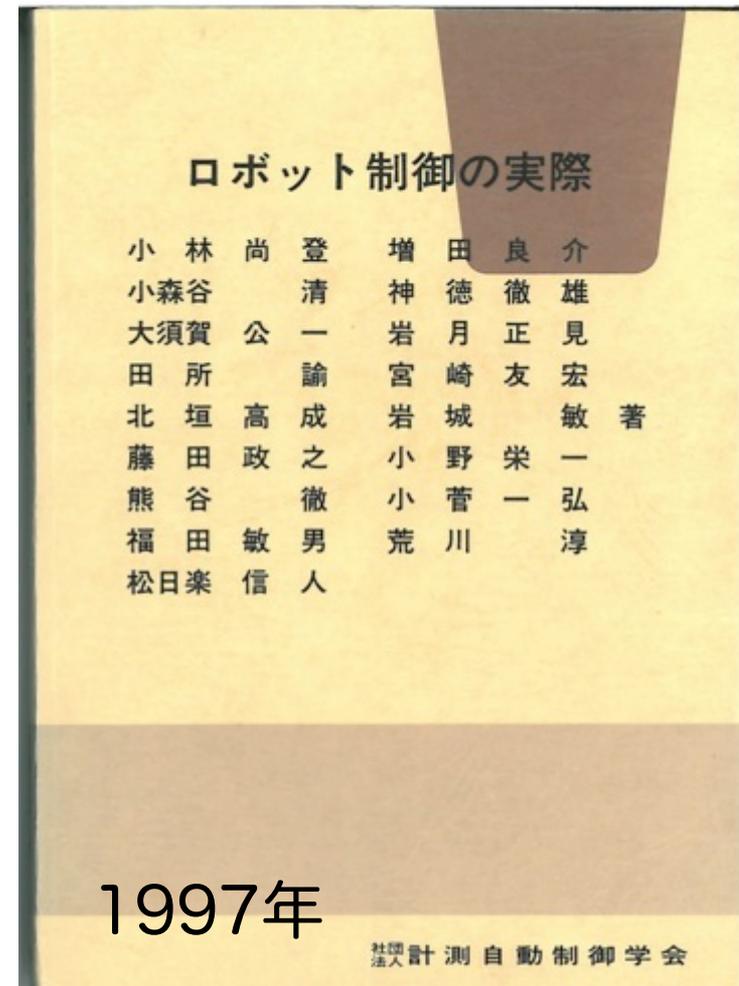
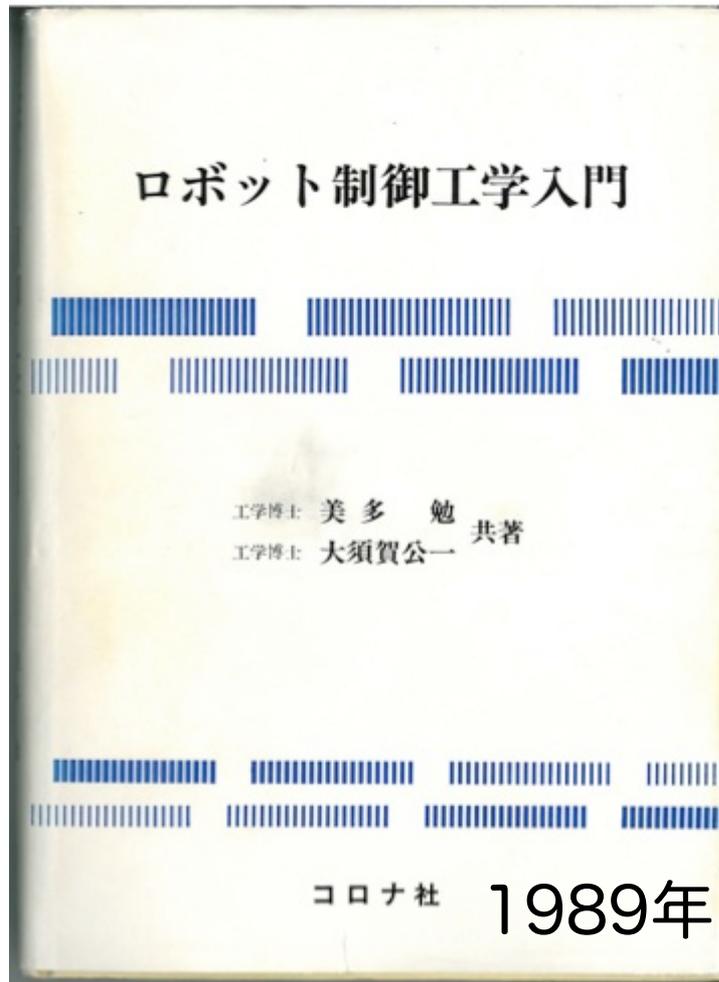
Emuの捉え方



フリージョイント

流れ1 基礎：モデルベースド制御

ロボット制御の定石



流れ1 基礎：モデルベースド制御

ロボット制御の定石

ロボット制御の実際(1997)

計測自動制御学会 (ロボティクス部会編集)

第 1章 ロボットの運動学

第 2章 ロボットの動力学

第 3章 ロボットの同定

第 4章 位置・軌道制御

第 5章 力制御

第 6章 ロバスタ制御

第 7章 適応制御

第 8章 最短時間制御

第 9章 フレキシブルロボットアームの制御

第10章 協調制御

第11章 マスタスレーブマニピュレータの制御

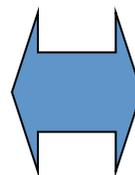
流れ1 基礎：モデルベース制御（まとめ）

モデリングと制御

新しい制御理論の構築とそのロボット系への適用・展開

制御理論

- 非線形適応制御
- 出力フィードバックによる H_∞ 制御
- γ 外乱抑制二次安定化
- 二重構造ロバストモデル追従制御
-



ロボット

- 二慣性系
- 柔軟アクチュエータ
- マニピュレータ
- 脚ロボット
-

基本方策：

モデル化誤差を考慮した数理モデル＋制御理論構築

流れ1 基礎：モデルベース制御（まとめ）

モデリングと制御

新しい制御理論の構築とそのロボット系への適用・展開

モデルベース制御（+安定論）

メッセージ1：

きちんと運動方程式（支配方程式・モデル）を求め、きちんと制御することの訓練・重要性

基本方策：

モデル化誤差を考慮した数理モデル+制御理論構築

目次

横井さんからのお題

ROBOMECH89発表タイトル

大須賀，小野：メカニカルシステムのPD型二重構造ロバスト制御から25年たって、ロボット制御は、どう変遷して何ができるようになって、何がまだできないのかそれはなぜなのか、というようなお話をいただければと思います。

「自己の内に他を見，他の内に自己を見る」

—内即外・外即内—

(西田幾多郎)

- 流れ1 基礎：モデルベースト制御
- 流れ2 徴候：ダイナミクスベースト制御
- 流れ3 漸悟：陰的制御と陽的制御
- 流れ4 総括：お題への回答

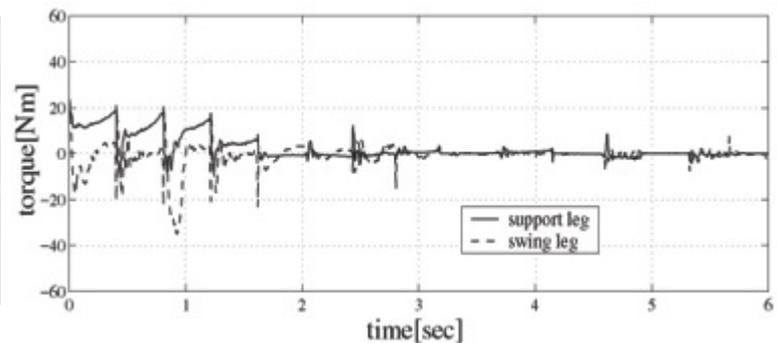
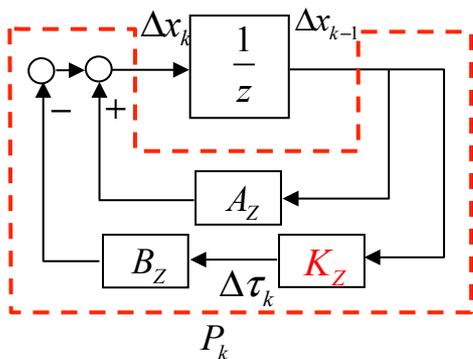
流れ2 徴候：ダイナミクスベースド制御

力学的制御論

制御対象の力学的特性を活かした制御理論の構築

非線形力学：非線形メカニカルシステムの受動性
(1998-) 受動的動歩行に内在するフィードバック構造

制御方策：遅延フィードバック制御
(2000-) 弱誘導型遅延フィードバック制御



ダイナミクスを活かした制御

流れ2 徴候：ダイナミクスベースド制御

いくつかの事件

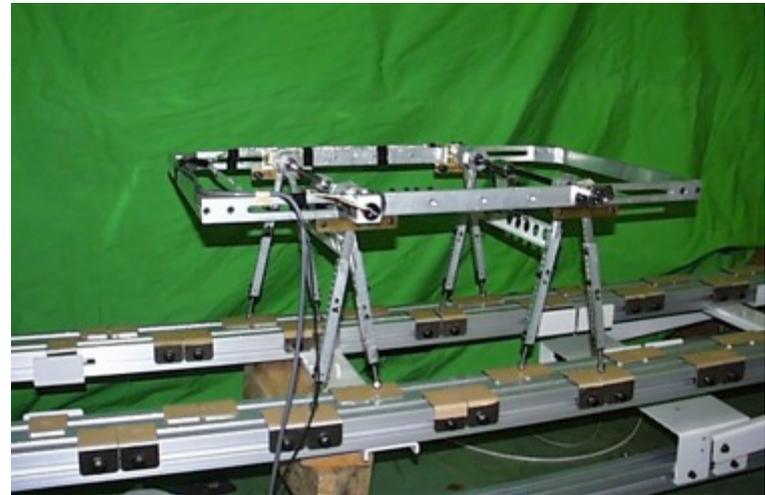
午前4時の戦い。

色々な課題をクリアーするギリギリは当日の午前4時

- DARM-2による小太鼓演奏（大須賀:1985）
- Quartet-IIによる分岐現象実証（桐原:1998）



DARM-2(大須賀)



Quartet II(桐原)

流れ2 徴候：ダイナミクスベースド制御

いくつかの事件

午前4時の戦い。

色々な課題をクリアーするギリギリは当日の午前4時

- DARM-2による小太鼓演奏（大須賀:1985）
- Quartet-IIによる分岐現象実証（桐原:1998）



DARM-2(大須賀)



ダイナミクスベースド制御の芽生え

1985(大須賀)

流れ2 徴候：ダイナミクスベースド制御

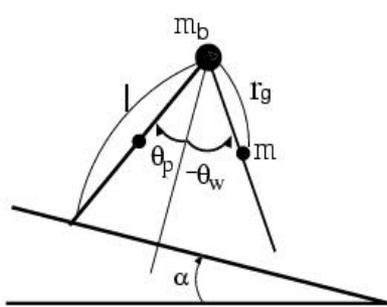
力学的制御論

制御対象の力学的特性を活かした制御理論の構築

受動的動歩行(1998)

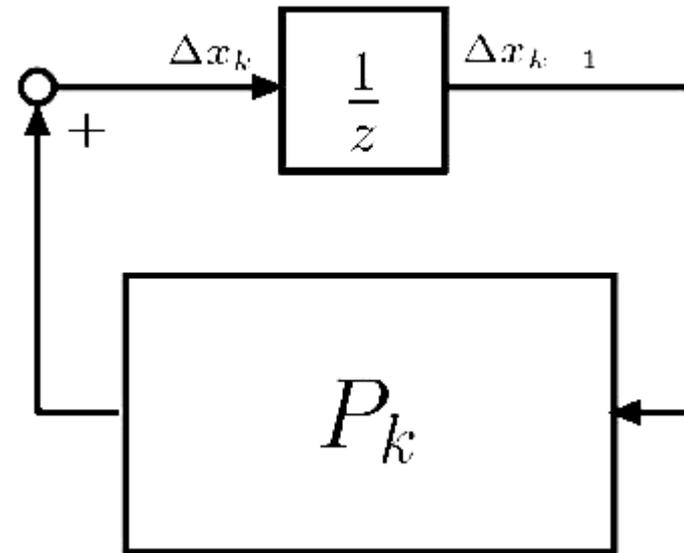


桐原



$$\Delta x_k = P_k(\Delta x_{k-1})$$

安定性の
解明



受動的動歩行の
離散力学モデル

流れ2 徴候：ダイナミクスベースド制御

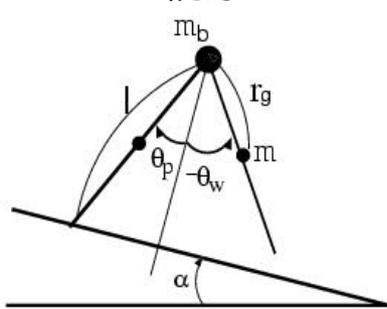
力学的制御論

制御対象の力学的特性を活かした制御理論の構築

受動的動歩行(1998)

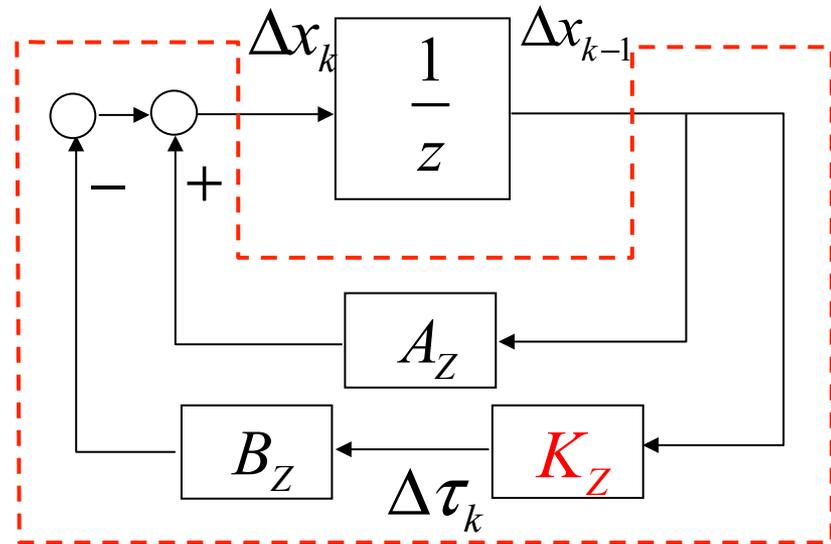


桐原



$$\Delta x_k = P_k(\Delta x_{k-1})$$

安定性の
解明



$$P_k = A_Z - B_Z K_Z$$

Implicit Feedback Structure(2005)

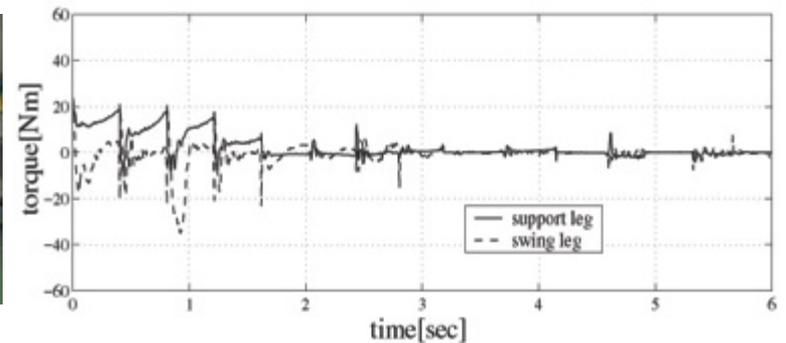
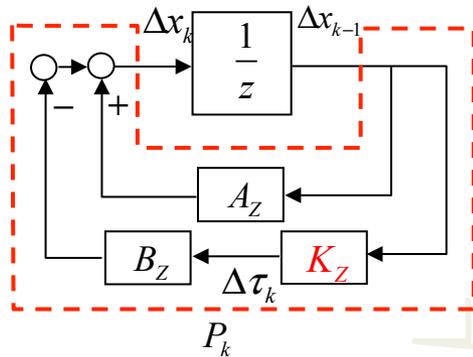
(杉本, 大須賀, 平田)

流れ2 徴候：ダイナミクスベースド制御（まとめ）

力学的制御論

制御対象の力学的特性を活かした制御理論の構築

ダイナミクスベースド制御



基本方策：

制御対象のダイナミクスを考慮した力学モデル

＋制御理論構築

流れ2 徴候：ダイナミクスベースド制御（まとめ）

力学的制御論

制御対象の力学的特性を活かした制御理論の構築

ダイナミクスベースド制御

メッセージ2：

制御対象の力学特性を把握し，巧く活かすことの重要性

基本方策：

制御対象のダイナミクスを考慮した力学モデル
＋制御理論構築

目次

横井さんからのお題

ROBOMECH89発表タイトル

大須賀，小野：メカニカルシステムのPD型二重構造ロバスト制御から25年たって、ロボット制御は、どう変遷して何ができるようになって、何がまだできないのかそれはなぜなのか、というようなお話をいただければと思います。

「自己の内に他を見，他の内に自己を見る」

—内即外・外即内—

(西田幾多郎)

- 流れ1 基礎：モデルベースト制御
- 流れ2 徴候：ダイナミクスベースト制御
- 流れ3 漸悟：陰的制御と陽的制御
- 流れ4 期待：???

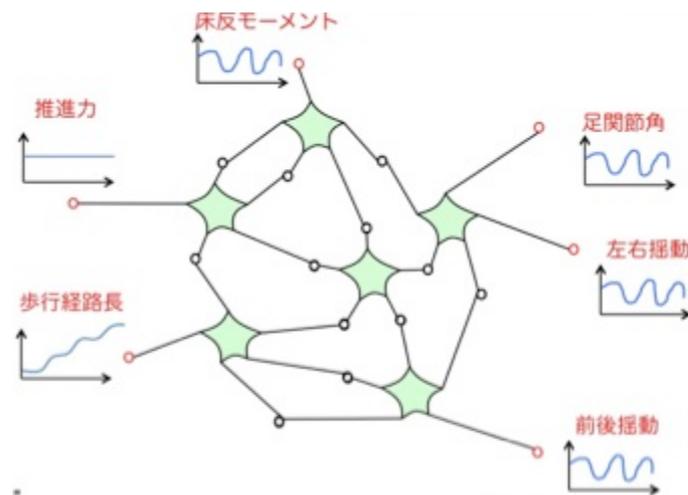
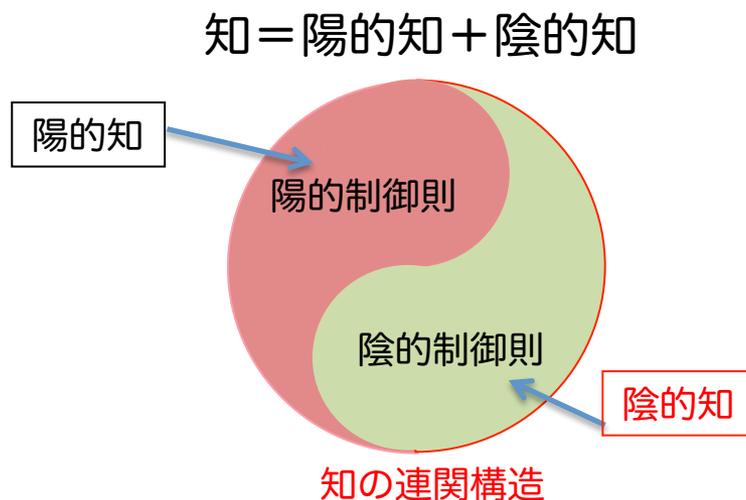
流れ3 頓悟：陰的制御と陽的制御

混然一体系の制御

「制御対象」と「場」の相互作用に埋め込まれた制御

移動知 (2005-2009) : 身体・脳・環境の相互作用から知が・・・
陰的制御の考え方

現象学的制御学 (2010-) : 準受動的動歩行に観られる逆転の発想
マルチポート動的システム(仮題)へ・・・



生物・非生物の統一的理解へ

流れ3 頓悟：陰的制御と陽的制御

文部科学省科学研究費補助金特定領域研究（領域番号 454）

身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現

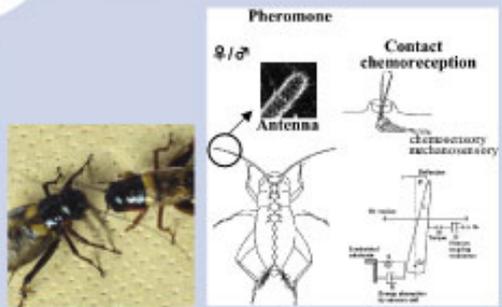
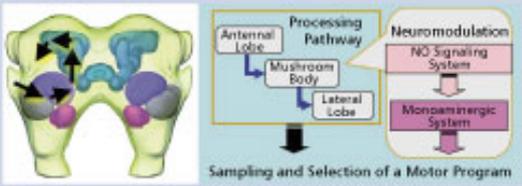
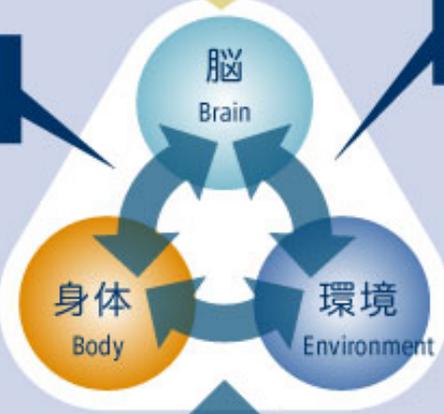
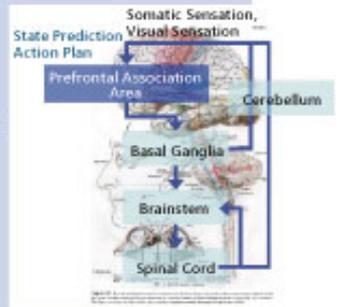
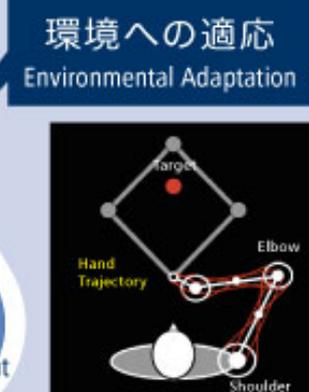
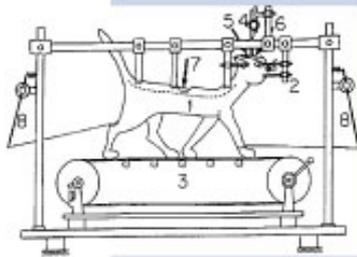
----移動知の構成論的理解（代：浅間）

生物学：神経生理学モデル
Biology: Physiological Model

生体システムモデル
Biological System Model

工学：動的モデリング
Engineering: Dynamic Model

移動知（適応的行動）
Mobiligence (Adaptive Motor Function)



共通原理 Common Principle

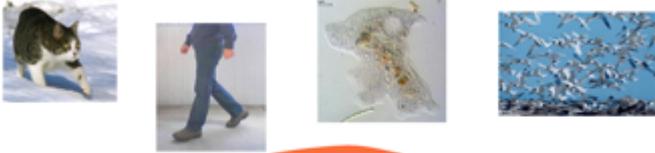
流れ3 頓悟：陰的制御と陽的制御

D班の提案

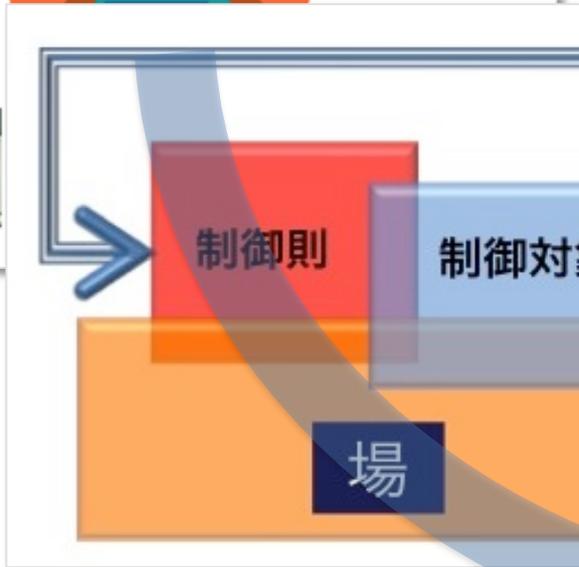
2010年の結論

「陰的制御」と「陽的制御」の双対構造

D班の考え方：2009年

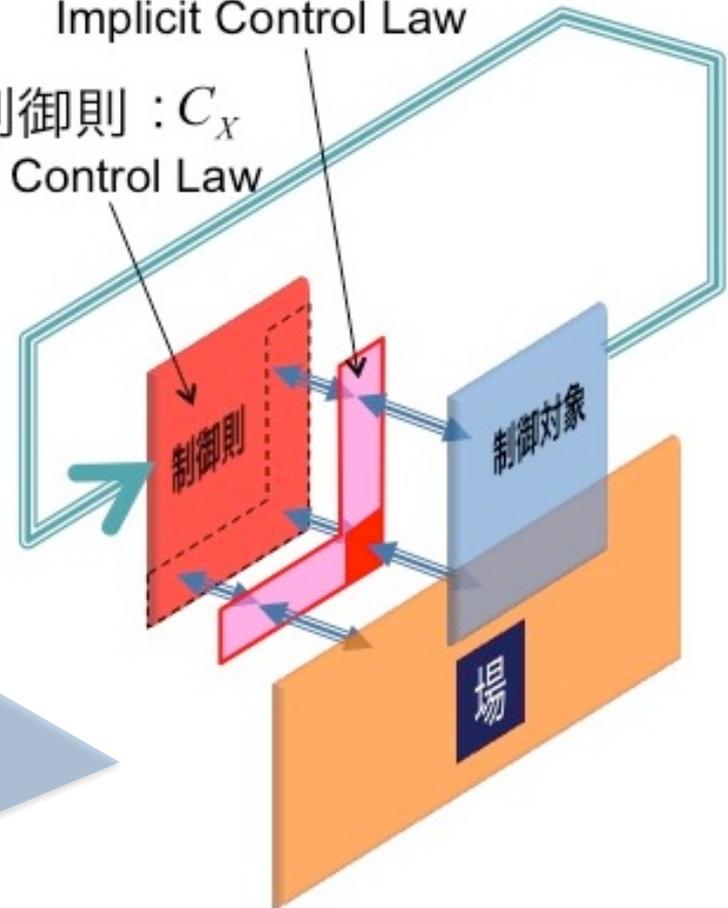


制御則



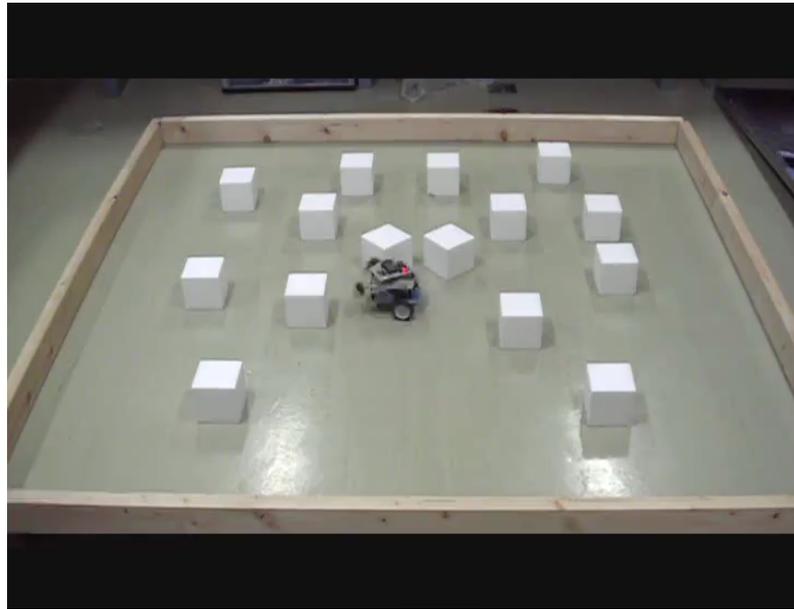
陰的制御則： C_I
Implicit Control Law

陽的制御則： C_X
Explicit Control Law



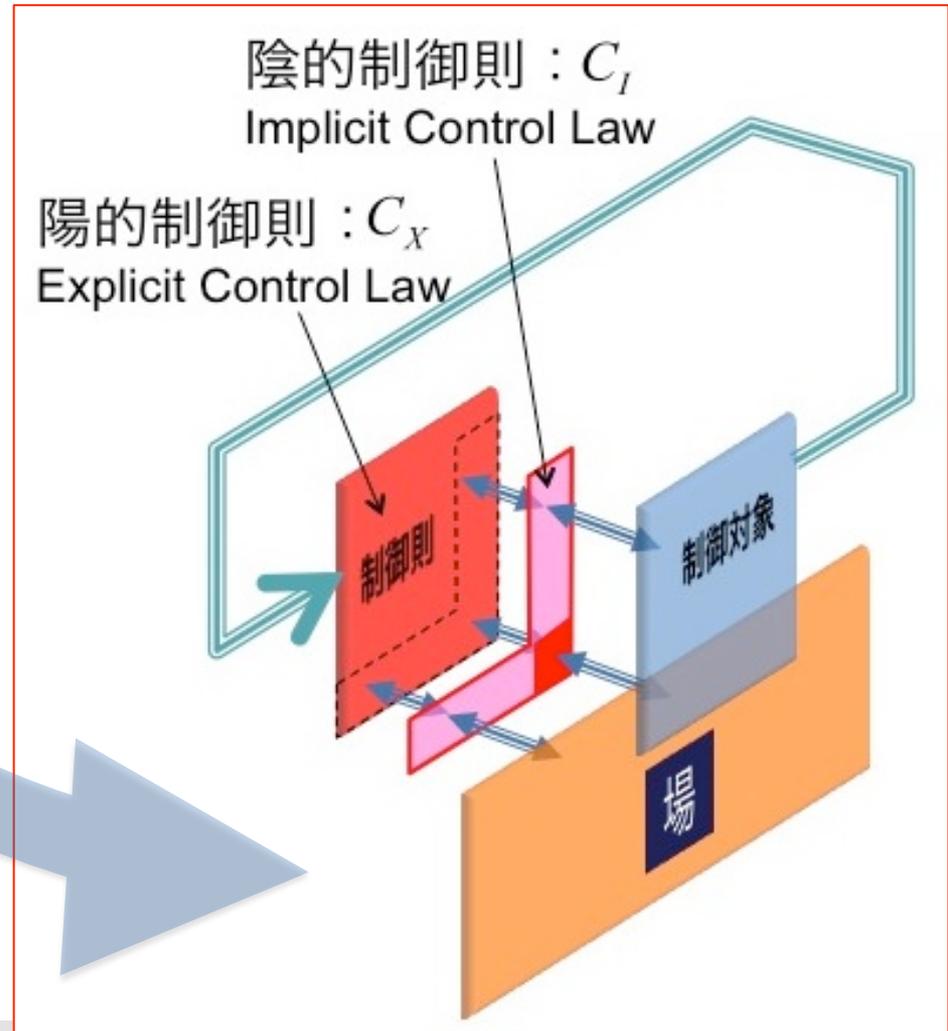
大須賀，石黒，鄭，杉本，大脇

流れ3 頓悟：陰的制御と陽的制御



2010年の結論

「陰的制御」と「陽的制御」の双対構造



Swiss Robot:末岡裕一郎

大須賀, 石黒, 鄭, 杉本, 大脇

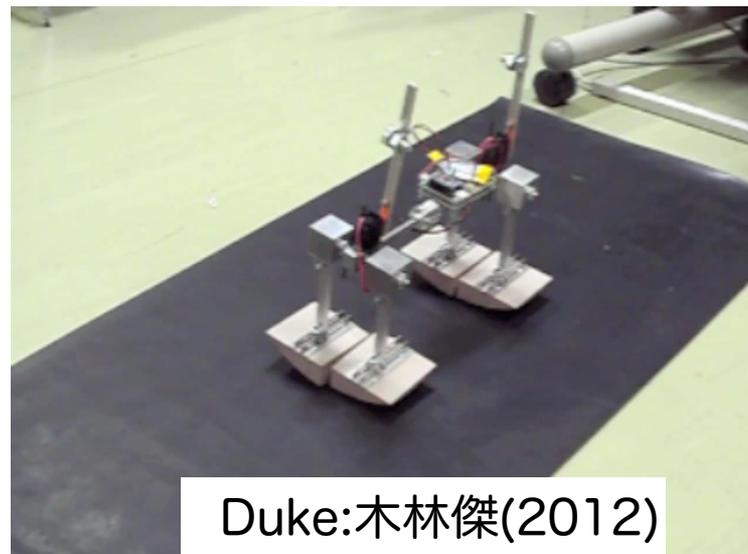
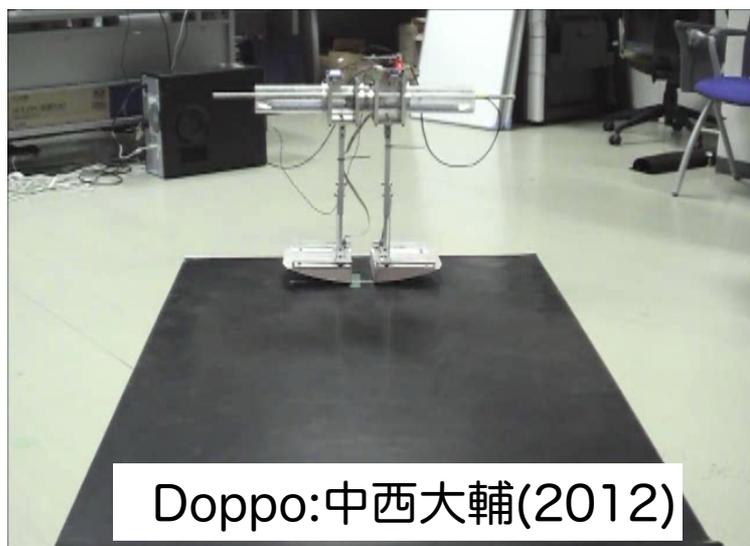
流れ3 頓悟：陰的制御と陽的制御

☆脚歩行再考・・・

通常：要因：脚を振り出す→結果：歩いた結果,胴体が揺動・・・

問：この要因→結果は必然？

逆転：要因：胴体を揺動→結果：脚が振れて歩く？

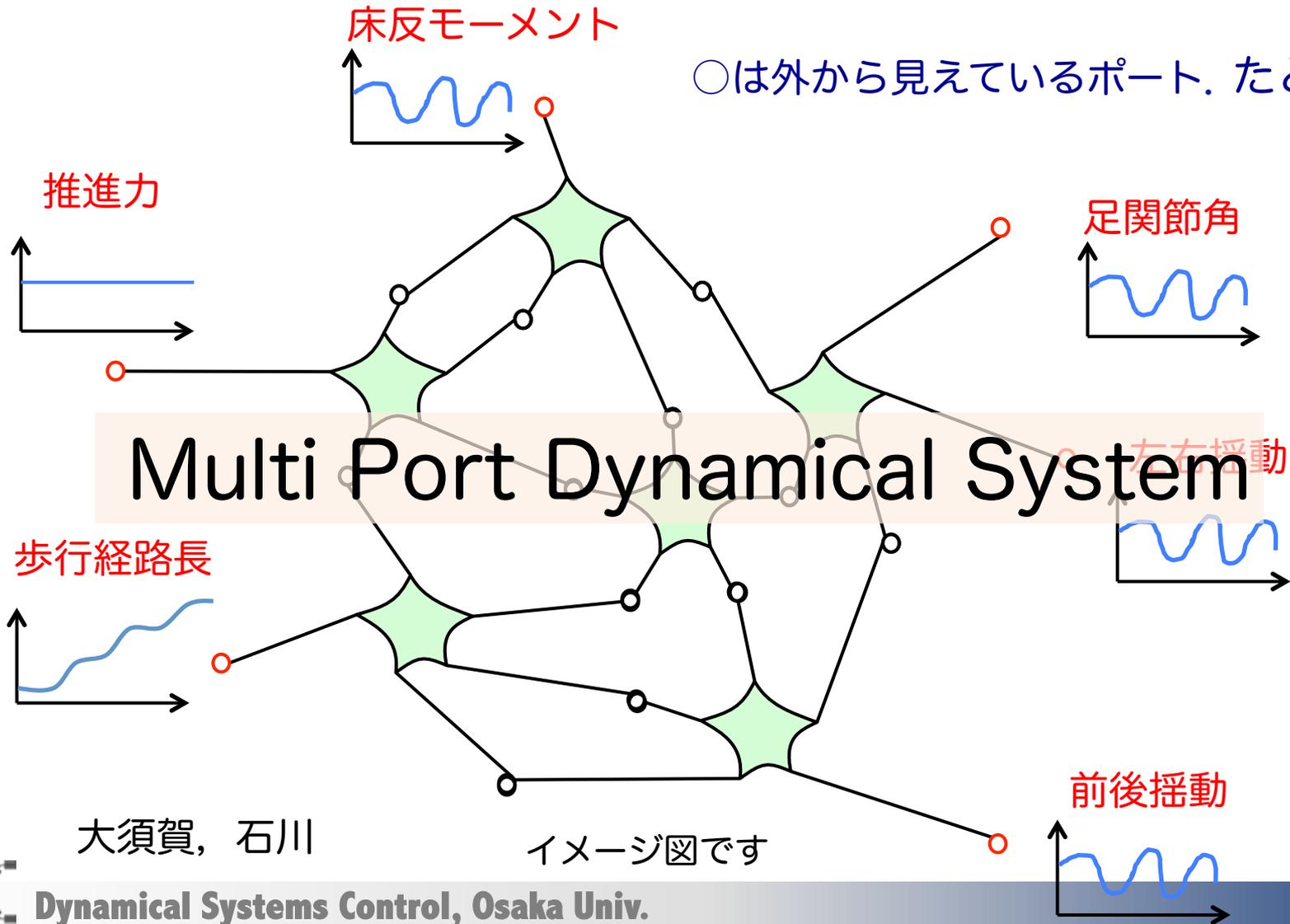


・・・一般化すると

流れ3 頓悟：陰的制御と陽的制御 ⑧

多数の物理要素のネットワーク結合からなるシステム

○は外から見えているポート. たとえば…



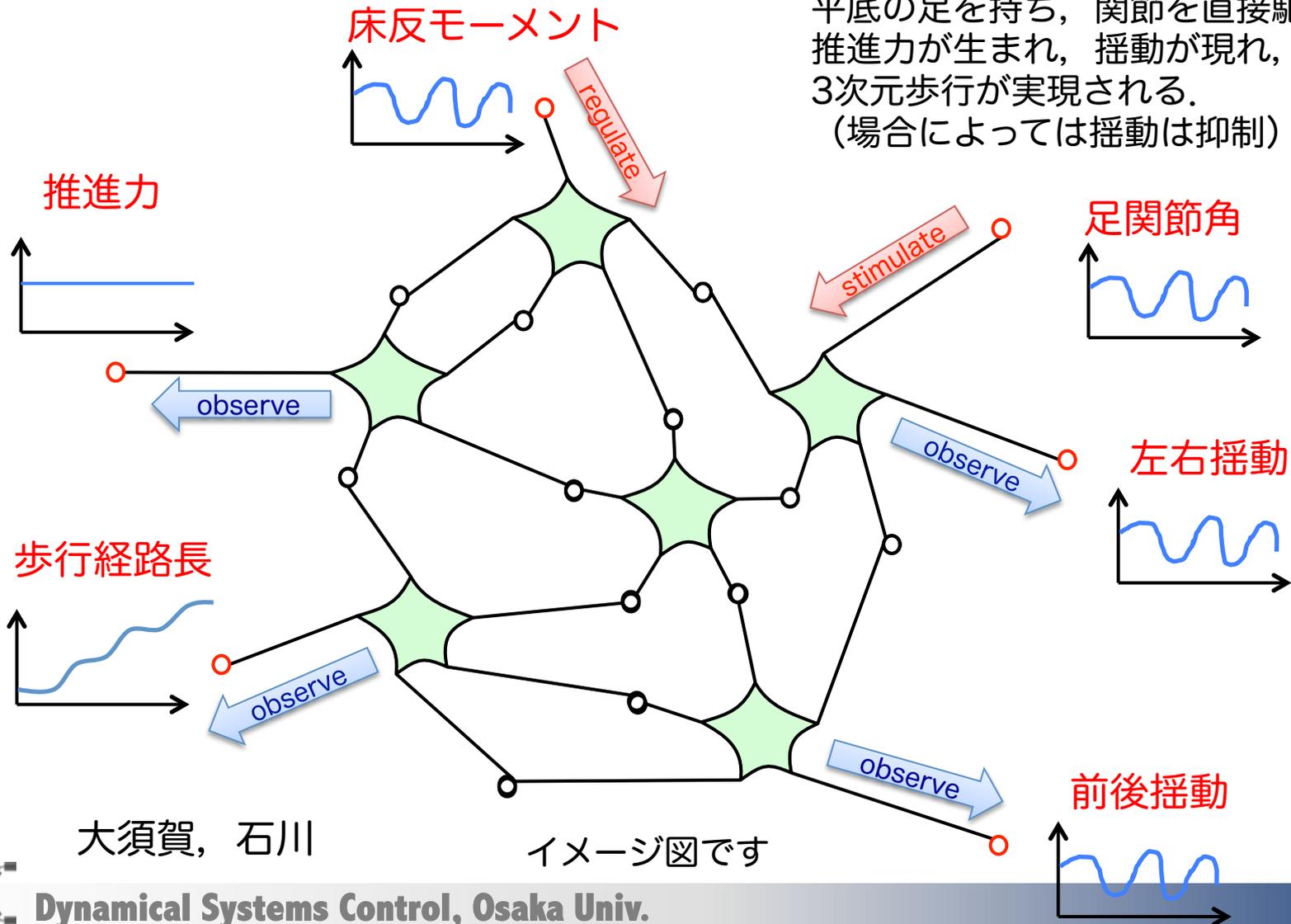
大須賀, 石川

イメージ図です

流れ3 頓悟：陰的制御と陽的制御 (秘)

フルアクチュエート歩行 (ASIMO的歩行)

平底の足を持ち、関節を直接駆動すると推進力が生まれ、揺動が現れ、3次元歩行が実現される。
(場合によっては揺動は抑制)



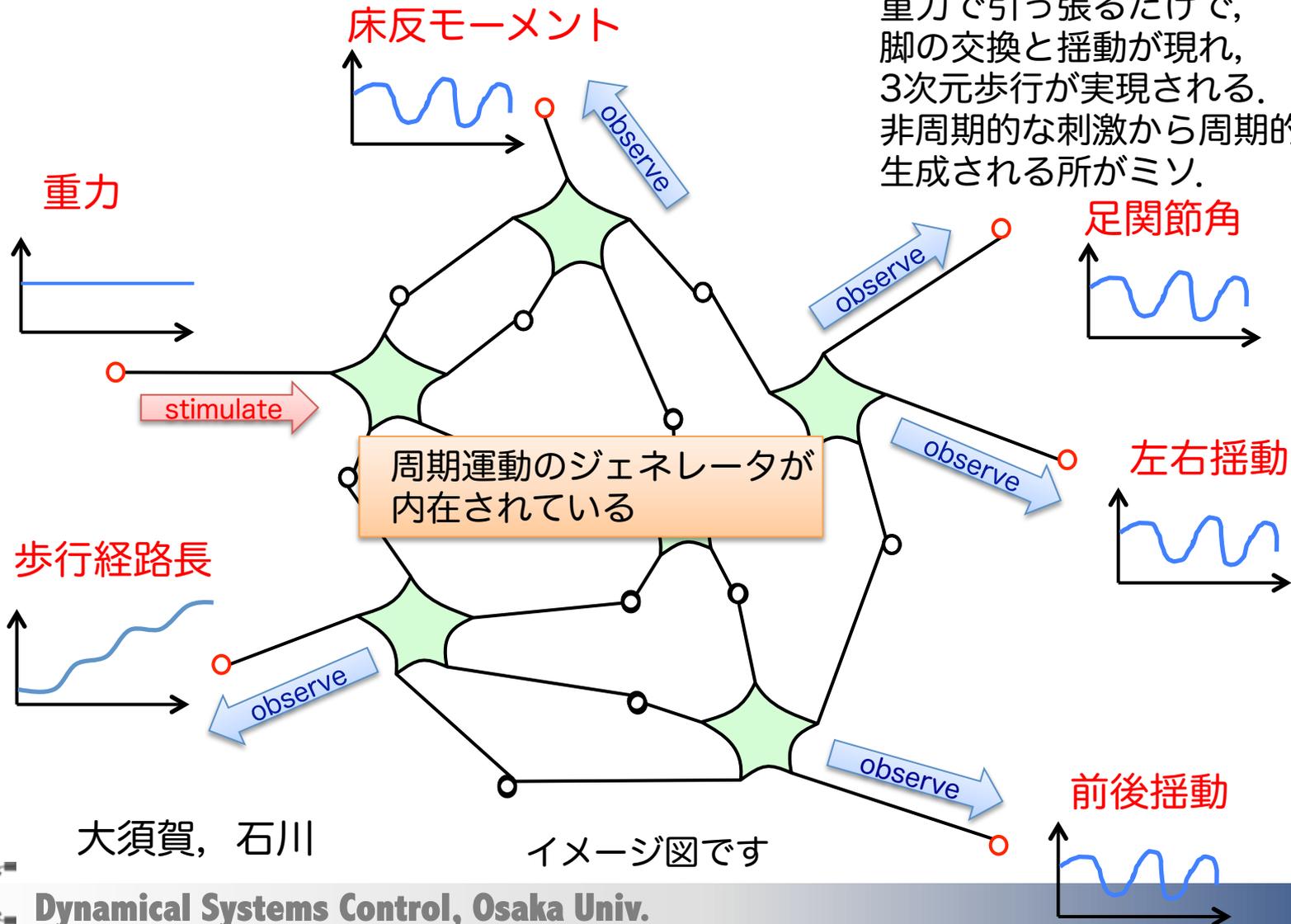
大須賀, 石川

イメージ図です

流れ3 頓悟：陰的制御と陽的制御 (秘)

受動的動歩行 (Cornel Walker)

重力で引っ張るだけで、
脚の交換と揺動が現れ、
3次元歩行が実現される。
非周期的な刺激から周期的な運動が
生成される所がミソ。



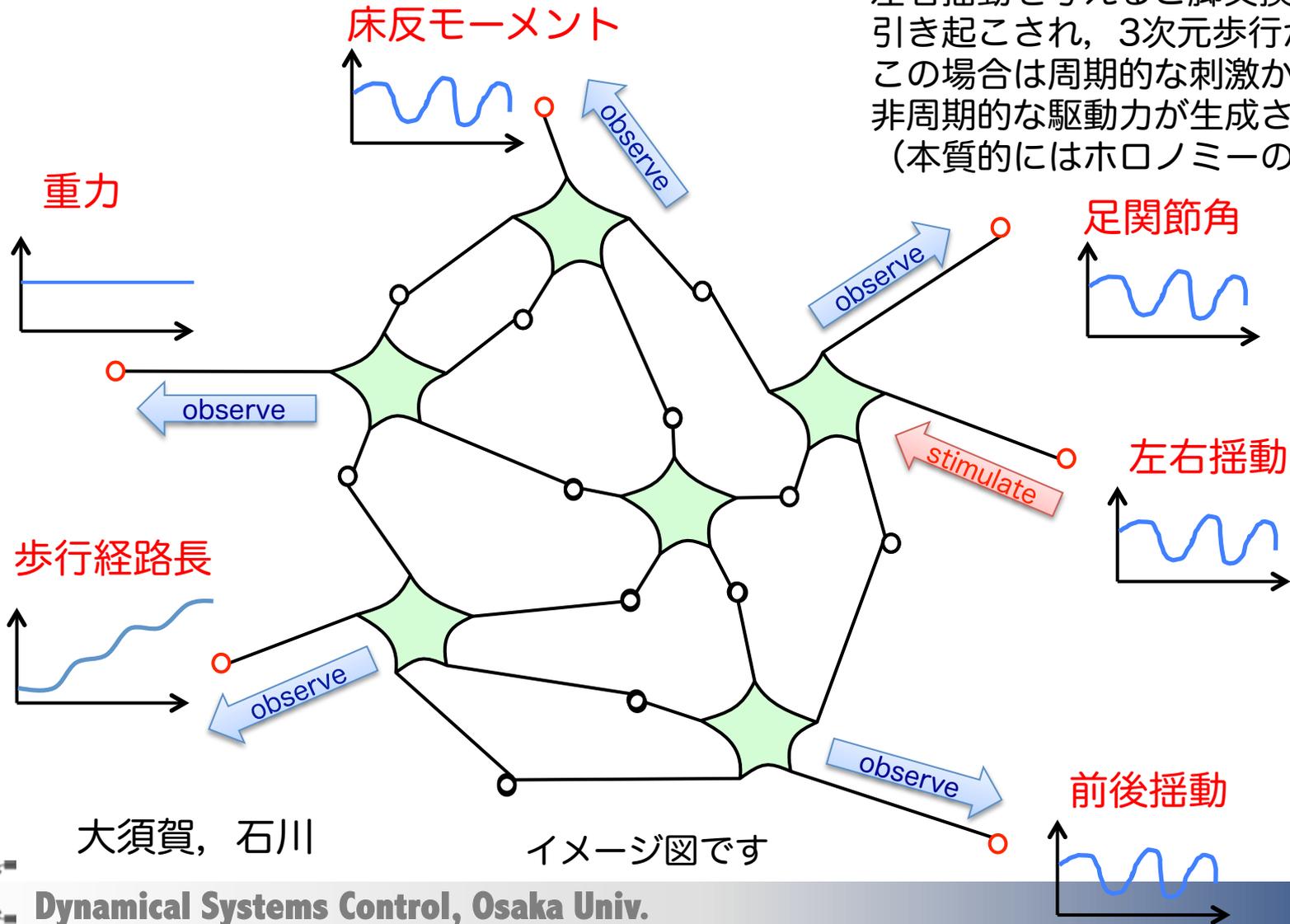
大須賀, 石川

イメージ図です

流れ3 頓悟：陰的制御と陽的制御 (秘)

揺動による動歩行 (Doppo, Martian, Duke)

左右揺動を与えると脚交換と前後揺動が引き起こされ、3次元歩行が起こる。
この場合は周期的な刺激から非周期的な駆動力が生成される。
(本質的にはホロノミーの原理)



大須賀, 石川

イメージ図です

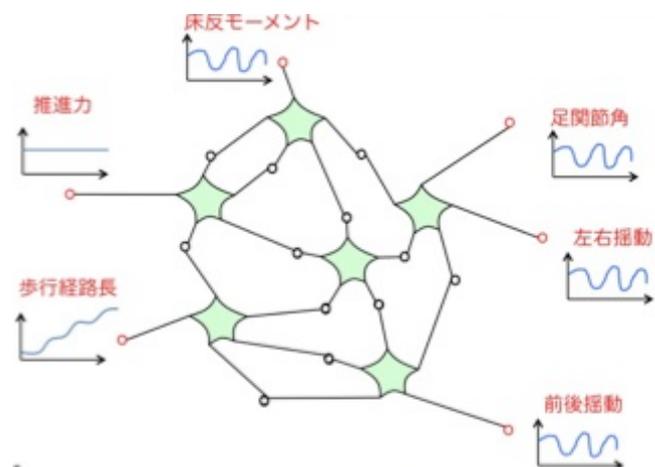
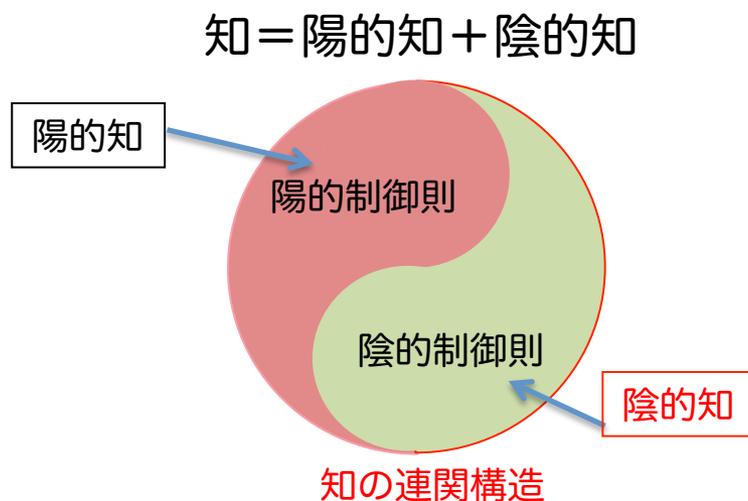
流れ3 頓悟：陰的制御と陽的制御（まとめ）

混然一体系の制御

「制御対象」と「場」の相互作用に埋め込まれた制御

移動知 (2005-2009) : 身体・脳・環境の相互作用から知が・
陰的制御の考え方

現象学的制御学 (2010-) : 準受動的動歩行に観られる逆転の発想
マルチポート動的システム(仮題)へ・



生物・非生物の統一的理解へ

流れ3 頓悟：陰的制御と陽的制御（まとめ）

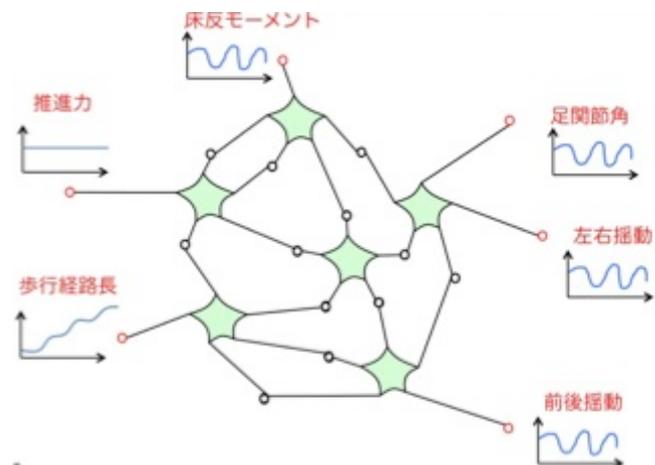
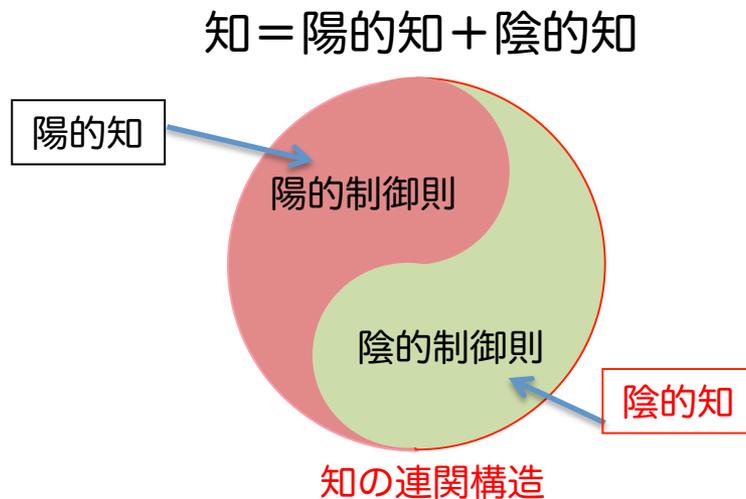
混然一体系の制御

「制御対象」と「場」の相互作用に埋め込まれた制御

制御＝陰的制御＋陽的制御

メッセージ3：

- 1) 身体と場を対等に受け入れる（身体の自己非完結性）
- 2) 要因と結果を決めつけない（純粹經驗的態度）



生物・非生物の統一的理解へ

目次

横井さんからのお題

ROBOMECH89発表タイトル

大須賀，小野：メカニカルシステムのPD型二重構造ロバスト制御から25年たって、ロボット制御は、どう変遷して何ができるようになって、何がまだできないのかそれはなぜなのか、というようなお話をいただければと思います。

「自己の内に他を見，他の内に自己を見る」

—内即外・外即内—

(西田幾多郎)

- 流れ1 基礎：モデルベースト制御
- 流れ2 徴候：ダイナミクスベースト制御
- 流れ3 漸悟：陰的制御と陽的制御
- 流れ4 総括：お題への回答

流れ4 総括：お題への回答

問1：ロボット制御は、どう変遷して何ができる

流れ1 基礎：モデルベースト制御

- 1) **きちんと運動方程式**（支配方程式・モデル）を求め、
- 2) **きちんと制御**することの訓練・重要性

流れ2 徴候：ダイナミクスベースト制御

- 1) 制御対象の**力学特性を把握**し、
- 2) **巧く活かす**ことの重要性

流れ3 頓悟：陰的制御と陽的制御

- 1) **身体と場を対等**に受け入れる（身体の自己非完結性）
- 2) **要因と結果**を決めつけない（純粹経験的態度）

流れ4 総括：お題への回答

流れ4 総括：お題への回答

問2：ロボット制御では、何がまだできないのかそれはなぜ？

課題：無限定環境へのリアルタイム適応（数理的理論）

・ ・ただ、そもそも本当にこれまでの課題はクリア？

理由：因果律に反する不良設定問題としての逆問題（矢野雅文）

☆これまでのフィードバック制御の限界？

→自己参照性，自己言及性の実現

☆これまでの定石的解法の限界？

→何等かの視野狭窄に陥っている可能性

方策：これまでの「型」を一旦崩して先入観無く考える

・ ・ただ、これまでの「型」あつての飛躍

→「哲学」的考察を今こそトントンする！

・ ・「えー、哲学なんて」と言わない(^^)

ロボット制御学における “そもそも”のすゝめ

大阪大学 大須賀公一

学んで思わざれば則ち^{くら}罔し、
思うて学ばざれば則ち^{あやう}殆し（孔子）

学んでも考えなければ、 [ものごとは] はっきりしない。
考えても学ばなければ、 [独断におちいって] 危険である。



西田哲学の純粹経験

「自己の内に他を見，他の内に自己を見る」

—内即外・外即内—



西田幾多郎「善の研究」



純粹経験：経験するというのは事実そのままに知るの意である。全く自己の細工を捨てて、事実に従うて知るのである。純粹というのは、普通に経験といっているのもその実は何らかの思想を交えているから、毫も思慮分別を加えない、真に経験そのままの状態を言うのである。

ここで西田が念頭においているのは、自己と環境，あるいは主体と客体との間の関係である。自己は環境によって「作られたもの」であり，環境は自己を「作るもの」であるが，同時に自己は環境を「作り」，環境は自己によって「作られる」。小坂国継「西田幾多郎の思想」