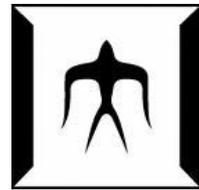




# 受動性に基づく人間・ロボティック ネットワークの協調制御および検証



制御システム工学科

藤田研究室

10-23055 宮沢 奈津矢

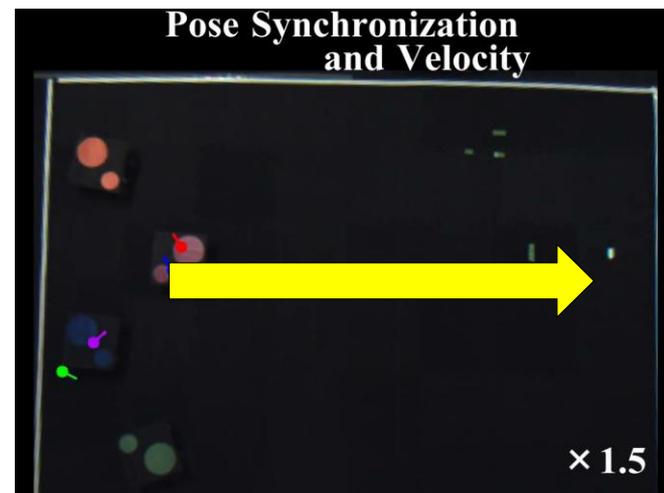


## ロボティックネットワークの協調制御

複数のロボットが局所的な情報をもとに  
協調してシステム全体の目的を達成

### 従来研究 [1]

- ・協調するロボット**すべて**に共通の指令
- ・**あらかじめ決められた**フィードフォワードの  
速度指令によって所望の動きを達成  
↳ 誰が決めてる？ どう決めてる？



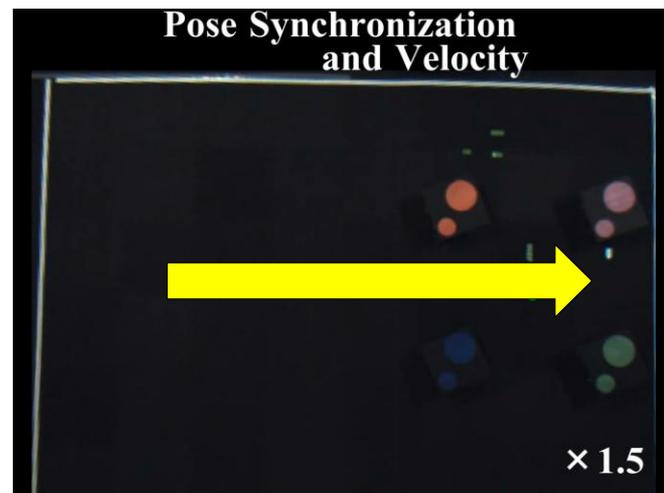


## ロボティックネットワークの協調制御

複数のロボットが局所的な情報をもとに協調してシステム全体の目的を達成

### 従来研究 [1]

- ・協調するロボット**すべて**に共通の指令
  - ・**あらかじめ決められた**フィードフォワードの速度指令によって所望の動きを達成
- ↳ 誰が決めてる？ どう決めてる？



### 本研究

- ・協調するロボットの**一部**と通信
- ・**人間**が位置情報をフィードバックし**リアルタイム**に速度指令を送ることで所望する位置での位置同期を達成

### 本発表

人間を含めた制御則の提案  
人間と仮想のロボットでの実験による検証

人間





# 人間・ロボティックネットワークの制御則

## 制御目的

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (q_i - r) = 0$$

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}$$

すべてのロボットの位置が  
人間が決める目標位置と一致

$L$ : ロボット間の通信構造を表す行列

$E$ : 人間と通信可能なロボットを表すベクトル

$v_d$ : 人間が送る速度指令

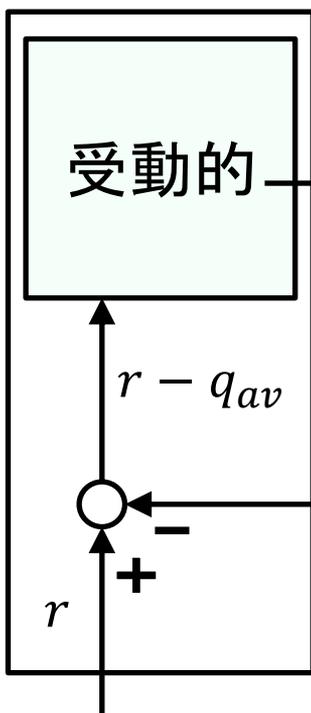
$m$ : 人間と通信可能なロボットの数

$q = [q_1 \dots q_n]^T$ : ロボットの位置

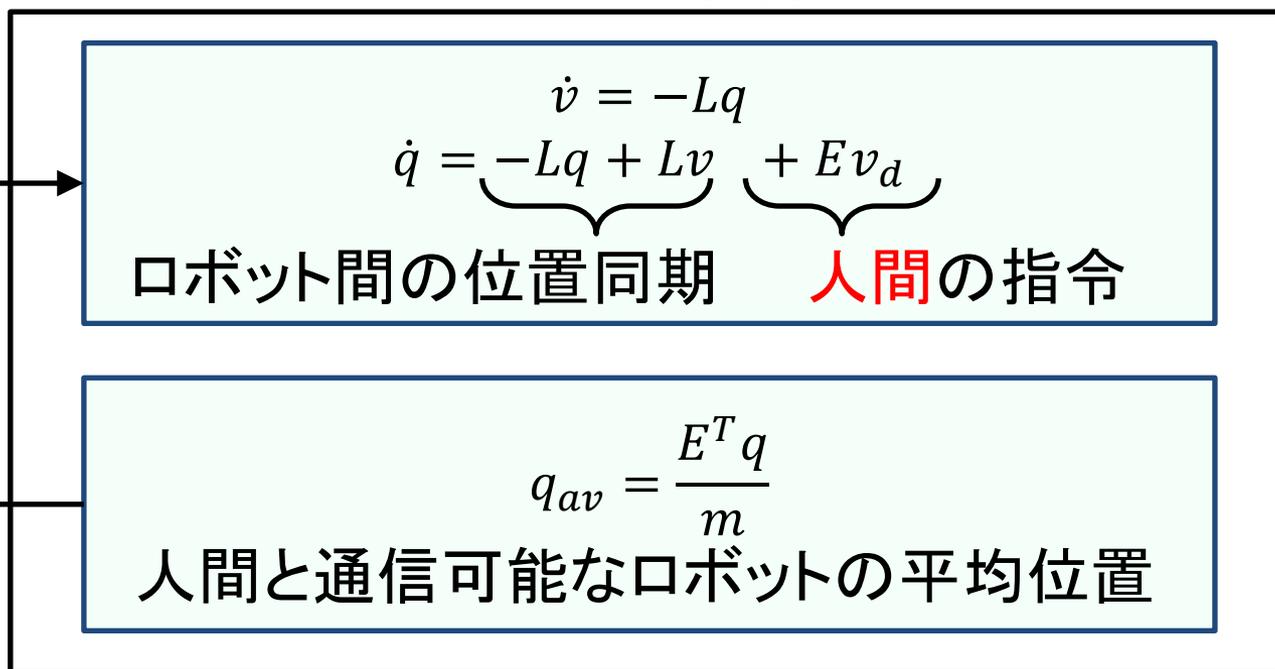
$r$ : 目標位置

$n$ : ロボットの数

## 人間



## ロボットの制御則





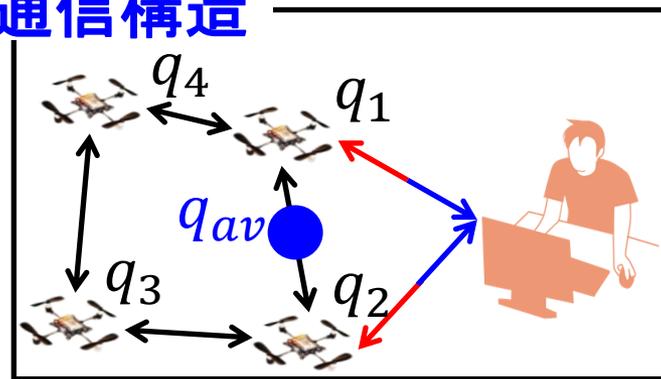
## 制御目的

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (q_i - r) = 0$$

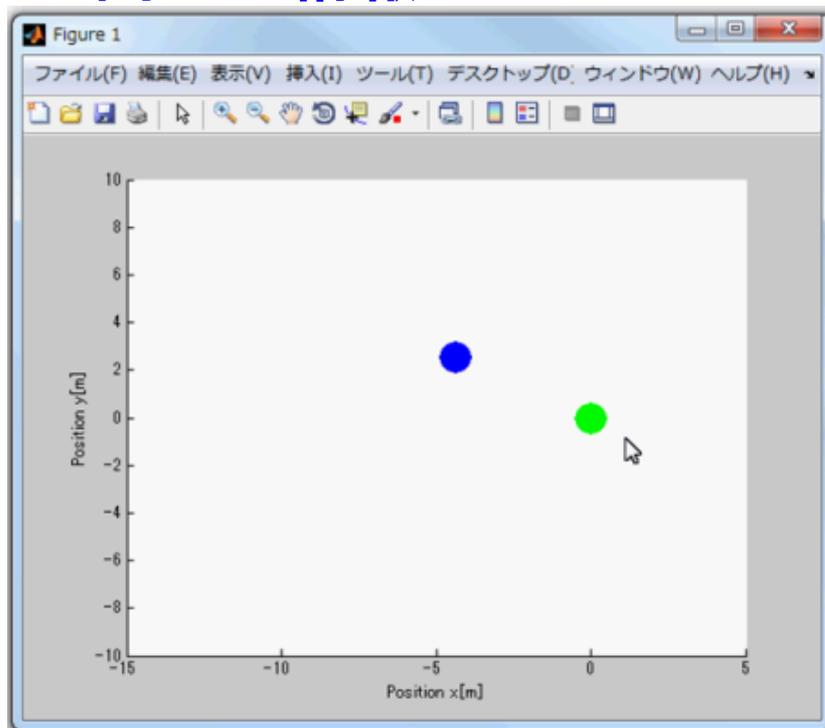
$$\forall i \in \{1, 2, 3, 4\}$$

すべてのロボットの位置が  
人間が決める目標位置と一致

## 通信構造



## 人間への情報



## 人間

受動的

$v_d$

マウスポインタ:  
速度指令を決定

$$q_{av} = \frac{q_1 + q_2}{2}$$

青丸: 人間と通信可能な  
ロボット1, 2の平均位置

緑丸: 目標位置の目安



## 受動性の十分条件

入力  $u(t)$ , 出力  $y(t)$  のシステム

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

は

$$u^T(t)y(t) \geq 0, \forall t \geq 0$$

ならば受動的なシステムである

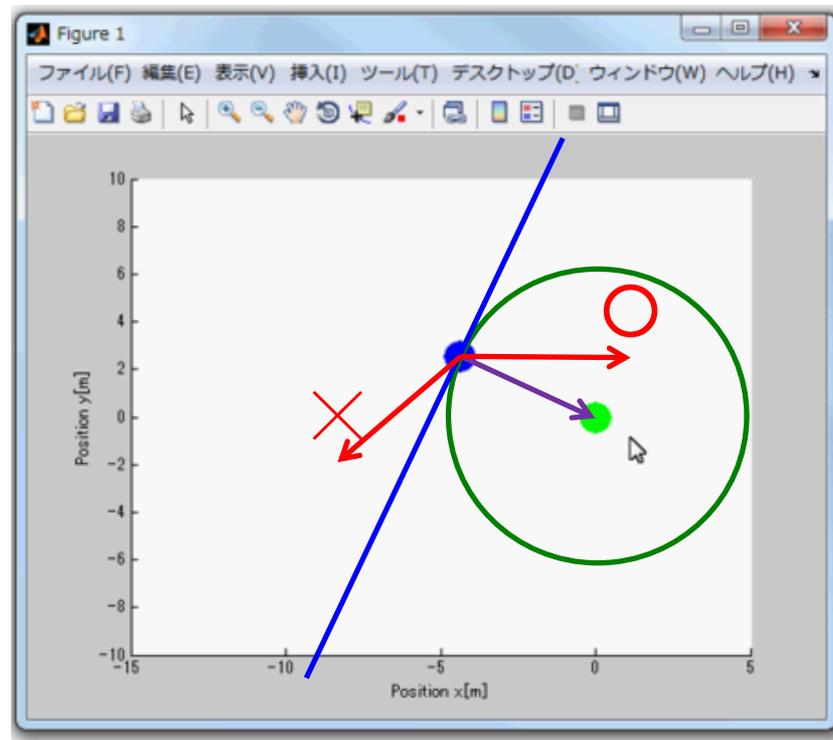
## 人間の受動性

入力  $r - q_{av}$ , 出力  $v_d$   
のシステムである人間は  
つねに

$$(r - q_{av})^T v_d \geq 0$$

⇕

( $r - q_{av}$  と  $v_d$  のなす角)  $\leq 90^\circ$   
ならば受動的である



紫矢印:  $r - q_{av}$

赤矢印○:  $v_d$  ( $(r - q_{av})^T v_d \geq 0$  の例)

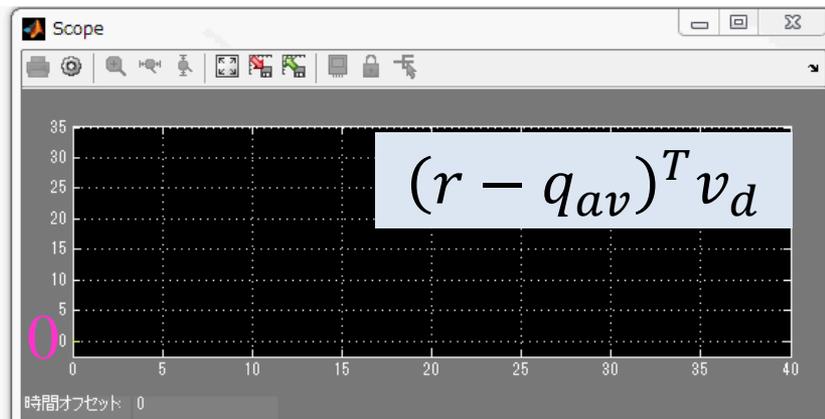
赤矢印×:  $v_d$  ( $(r - q_{av})^T v_d \geq 0$  でない例)

青線:  $r - q_{av}$  と直交し  $q_{av}$  を通る線

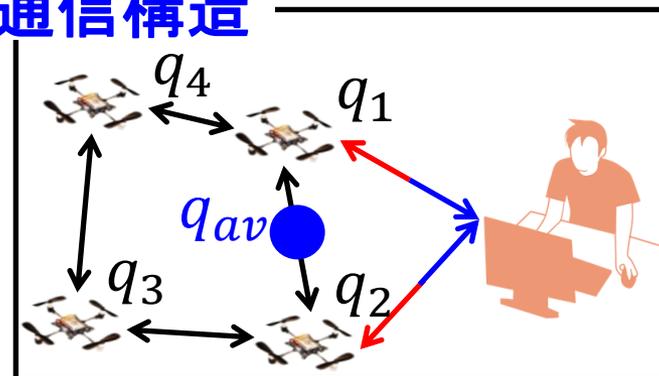
緑円: 中心  $r$  で  $q_{av}$  を通る円



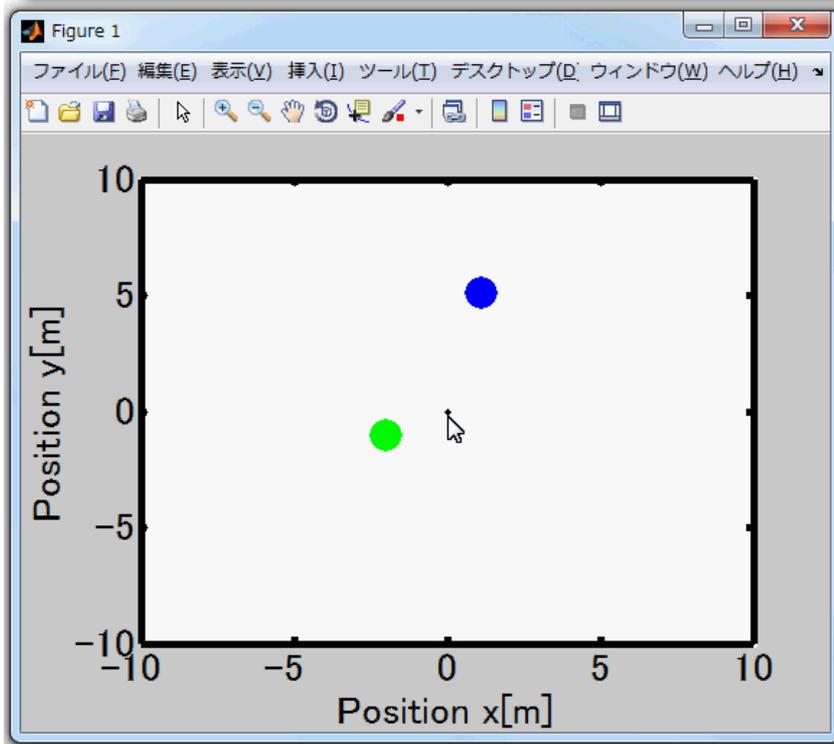
# 実験の様子



## 通信構造

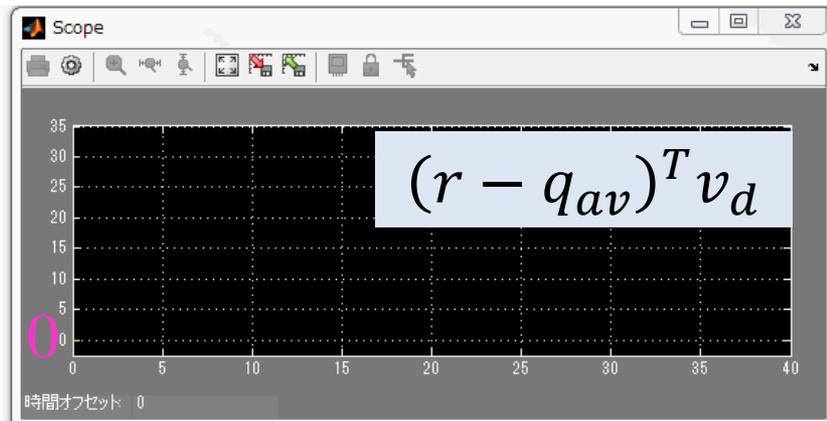


- $q_{av} = \frac{q_1 + q_2}{2}$  ロボットの位置の平均を青丸で表示
- 緑丸の中心を人間が目標位置として選んだとする
- 速度指令  $v_d$  は原点からマウスポインタへのベクトル

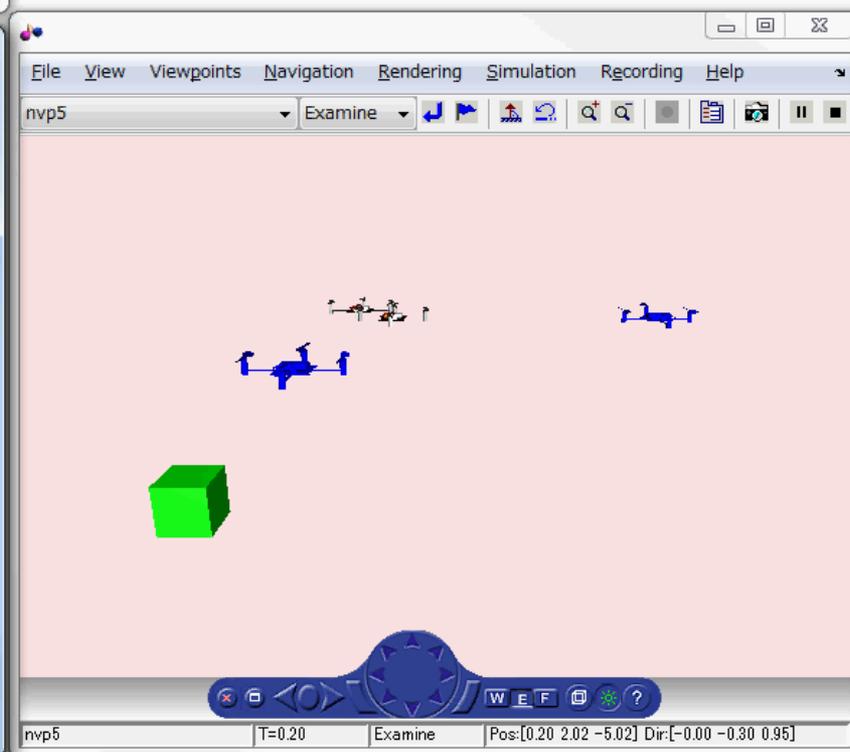
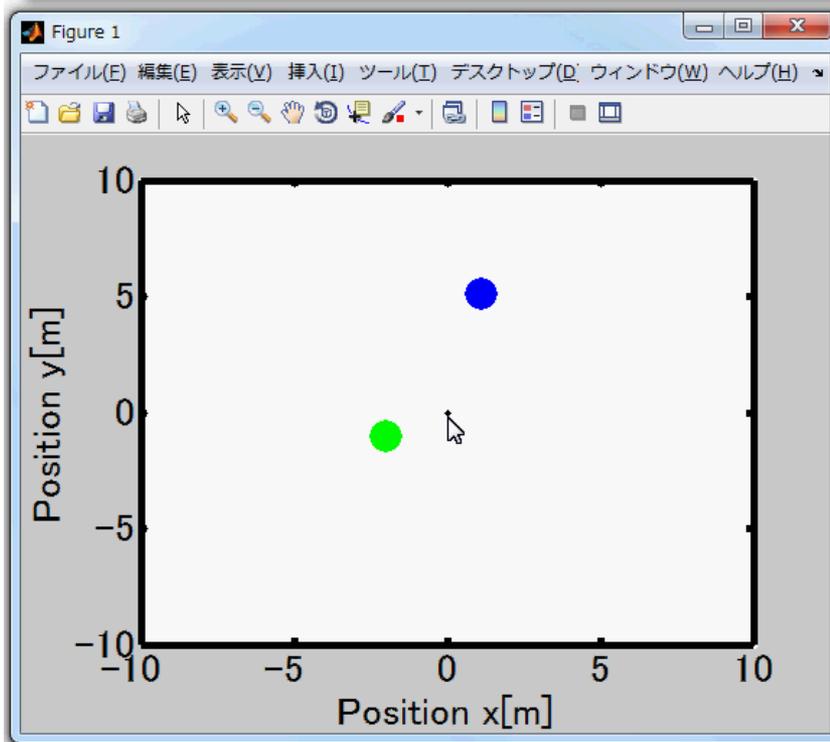
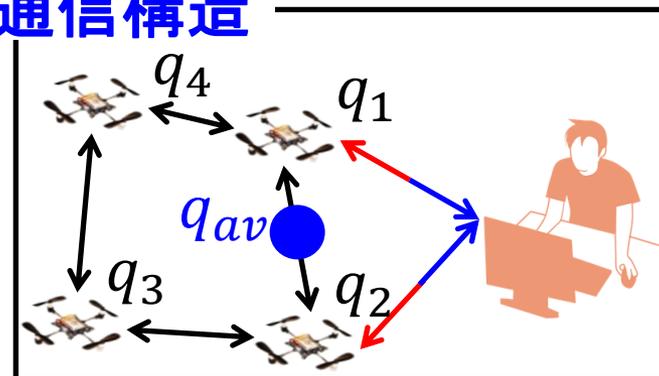




# 仮想のロボットの動き



## 通信構造



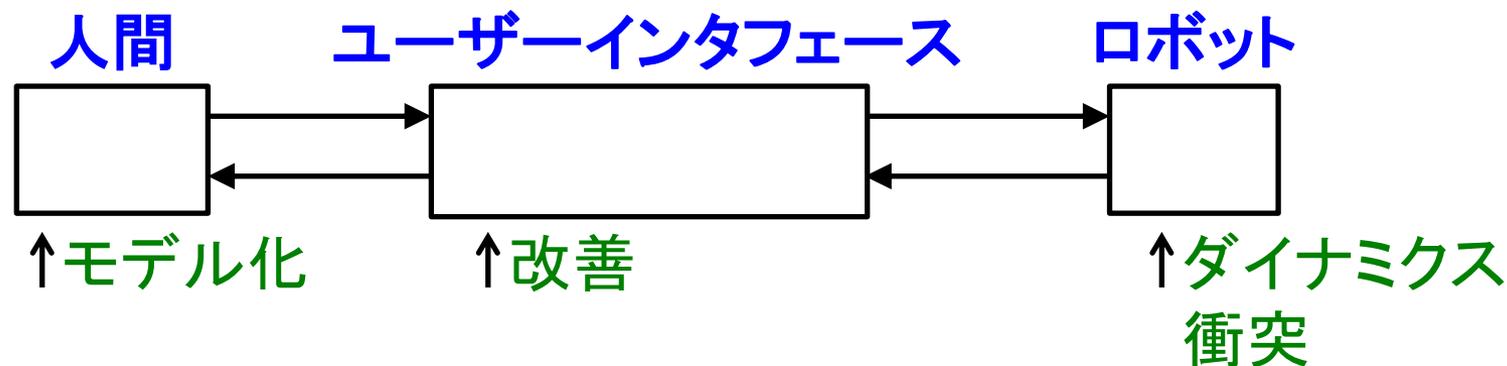


## まとめ

- 人間・ロボティックネットワークの制御則を提案
- 人間と仮想のロボットによる実験、検証

## 今後の課題

- 人間の特性の考慮、モデル化.
- ユーザーインターフェースの影響の考慮、改善.
- 実際のロボットを使った実験
  - ロボットのダイナミクスの影響の検証. 衝突回避.







- 日本地図
- ユーザーインターフェース
- 受動性
- 制御則、シミュレーション設定の詳しい説明(Lの中身) 通信構造(の仮定)
- 比較表
- 従来との構造比較

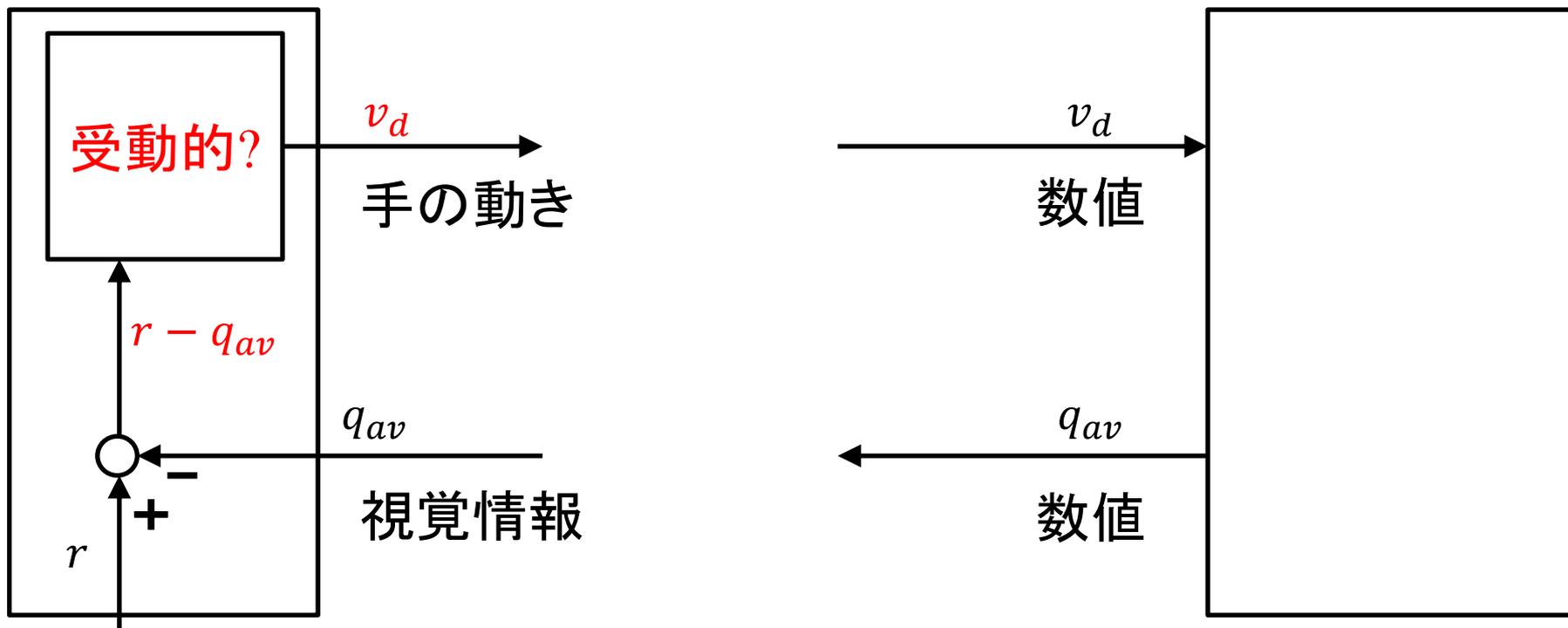




# 人間とロボットの間

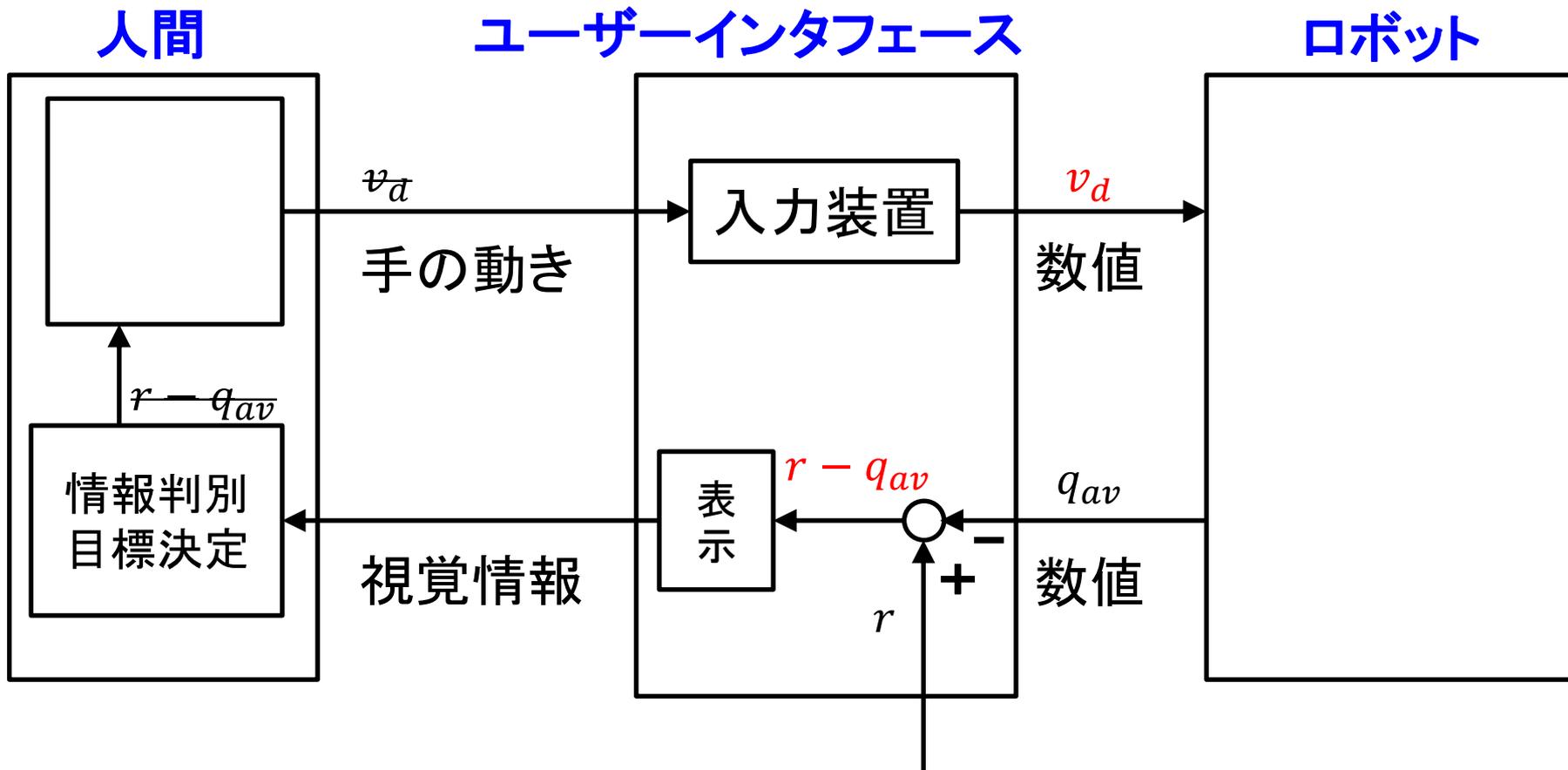
人間

ロボット



人間

入力  $r - q_{av}$  , 出力  $v_d$  のシステム



**人間、ユーザーインタフェース**  
入力  $r - q_{av}$  , 出力  $v_d$  のシステム



## 受動性の定義

入力  $u(t)$ , 出力  $y(t)$  のシステム

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, x(0) = x_0 \in \mathbb{R}^n,$$

$$y = h(x),$$

はすべての  $u \in \mathbb{R}^p, \tau \geq 0$  と  $x_0 \in \mathbb{R}^n$  で

$$S(x(\tau)) - S(x(0)) = \int_0^\tau u^T(t)y(t)dt - \int_0^\tau W(x(t))dt$$

を満たす半正定の蓄積関数  $S: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}_+$  と関数  $W: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}_+$  が存在するとき  $u$  から  $y$  まで受動的であるという

$\mathcal{D} \subset \mathbb{R}^n$  原点を含む領域

$$f: \mathcal{D} \rightarrow \mathbb{R}^n$$

$$g: \mathcal{D} \rightarrow \mathbb{R}^{n \times p} \quad u(t) \in \mathbb{R}^p$$

$$f(0) = 0 \quad y(t) \in \mathbb{R}^p$$

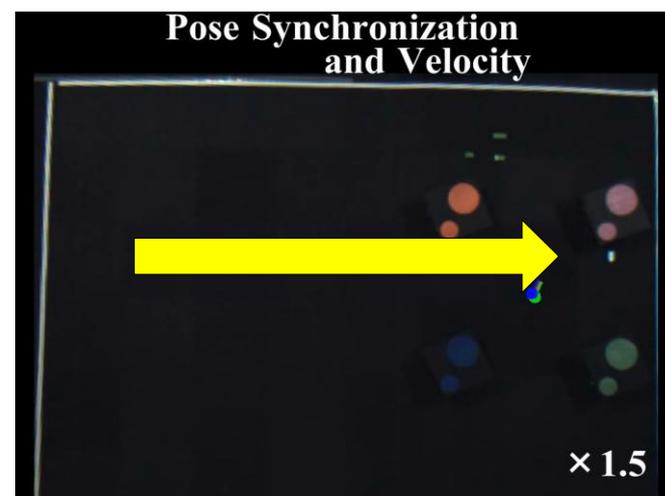
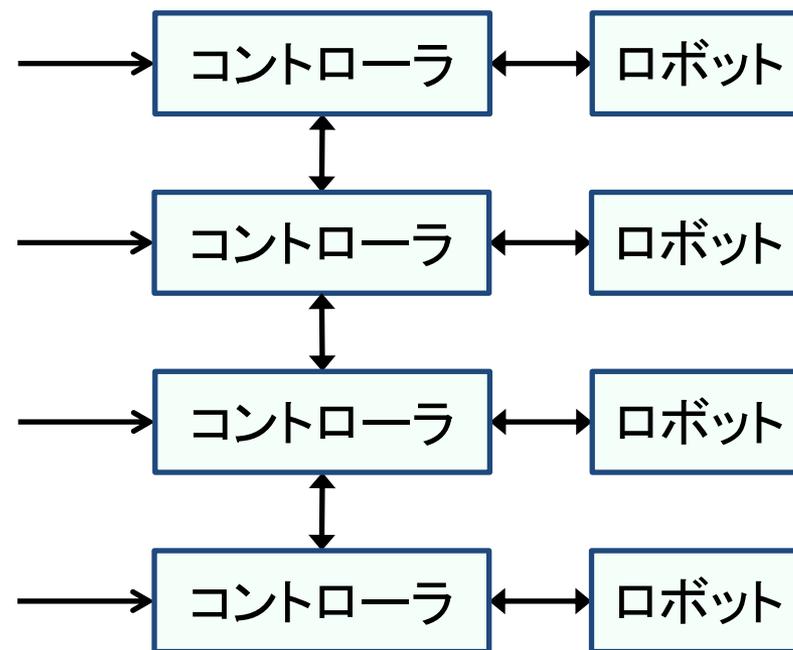


	従来研究	普通のラジコン	本研究
人間によるリアルタイム操作	×	○	○
協調	○	×	○
通信するロボット	すべて	1台	複数のうち一部



## 従来研究 [1]

- ・協調により位置同期達成
- ・すべてに共通の指令
- ・あらかじめ決められた  
フィードフォワード速度指令

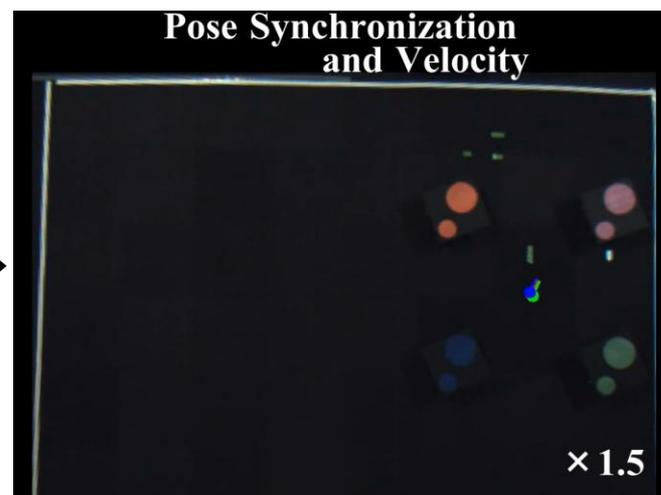
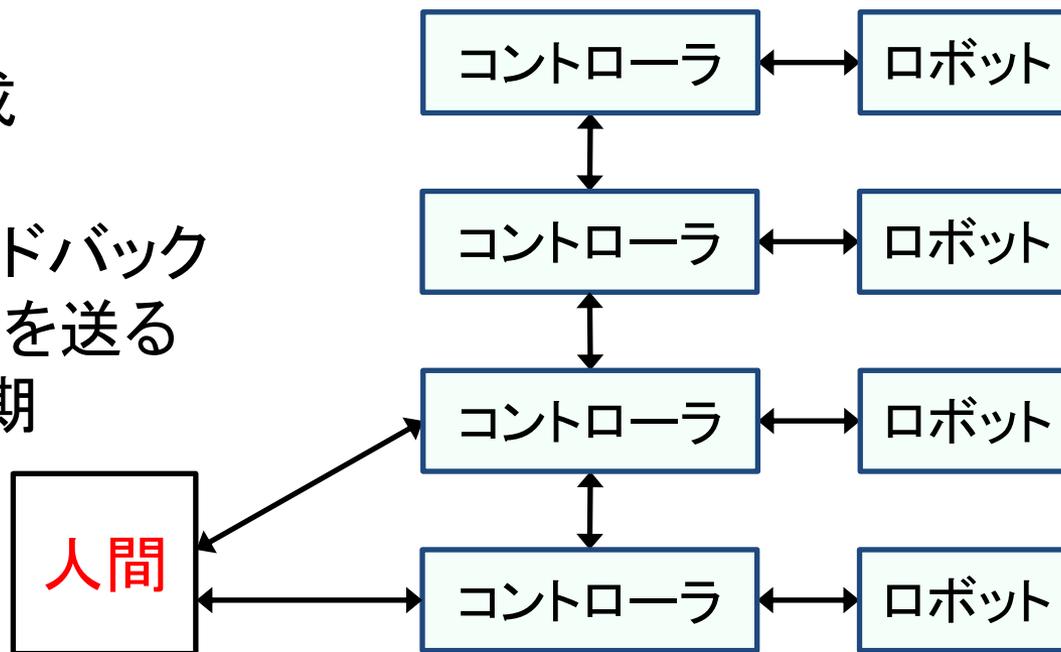


[1]岡崎, “全方向移動ロボットを用いた位置姿勢協調.”, 東京工業大学学士論文, 2011.



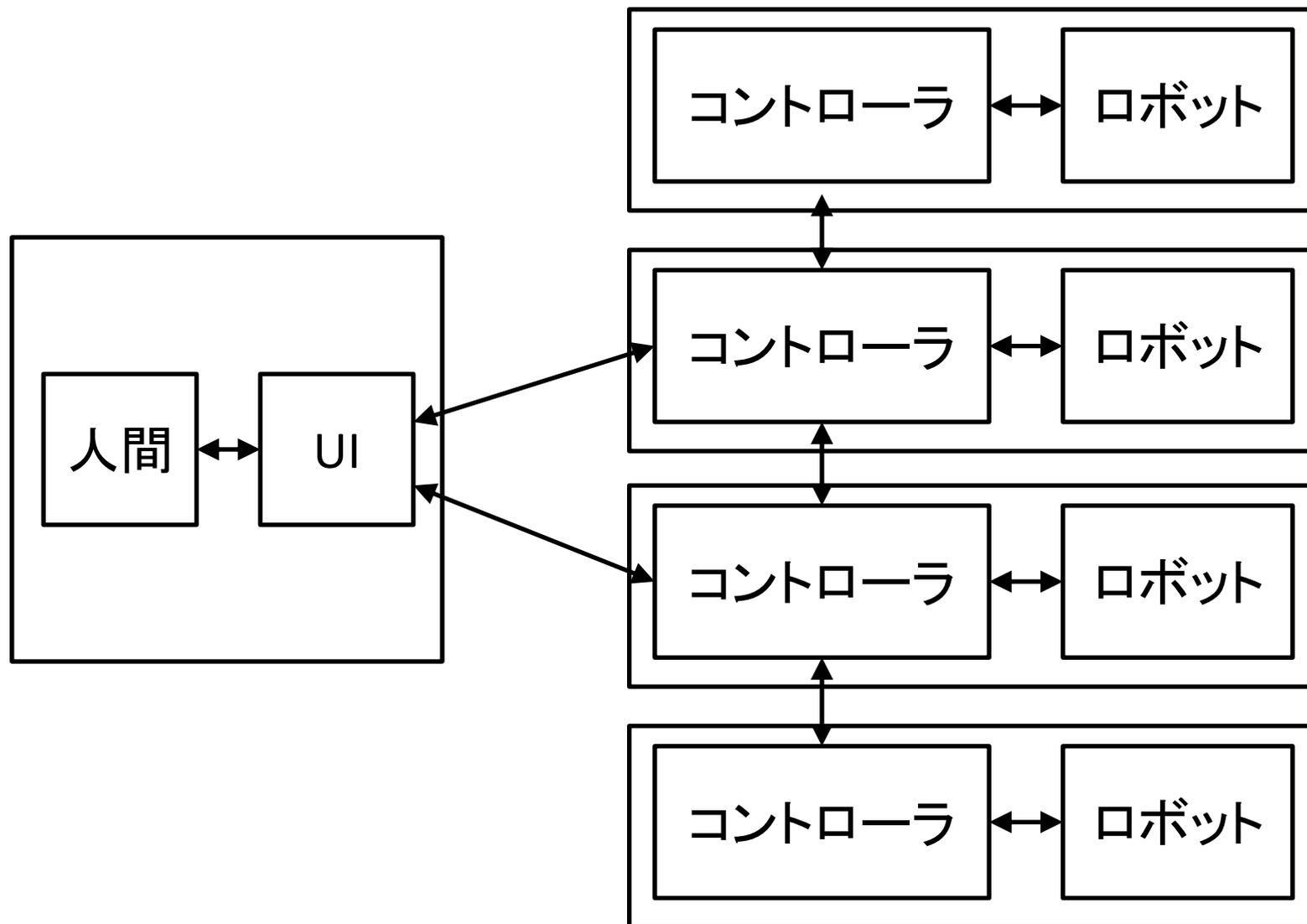
## 本研究

- ・協調により位置同期達成
- ・一部と通信
- ・人間が位置情報をフィードバック  
リアルタイムに速度指令を送る  
所望する位置で位置同期



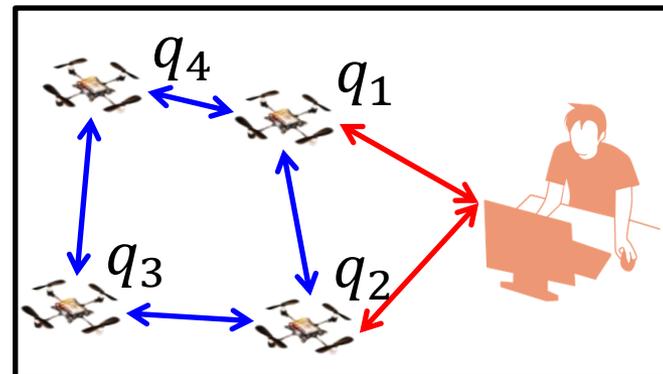


# 人間・ロボティックネットワークの制御構造





例



$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad m = 2$$

人間へのフィードバック

$$q_{av} = \frac{E^T q}{m} = \frac{q_1 + q_2}{2}$$

制御則

$$\dot{v} = -Lq$$

$$\dot{q} = \underbrace{-Lq + Lv}_{\text{ロボット間の位置同期}} + \underbrace{Ev_d}_{\text{人間の指令}}$$

ロボット間の位置同期      人間の指令

ロボット1 人間と通信可能

$$\dot{v}_1 = (q_2 - q_1) + (q_4 - q_1)$$

$$\dot{q}_1 = (q_2 - q_1) + (q_4 - q_1)$$

$$+ (v_1 - v_2) + (v_1 - v_4) + \underline{v_d}$$

ロボット3 人間と通信不能

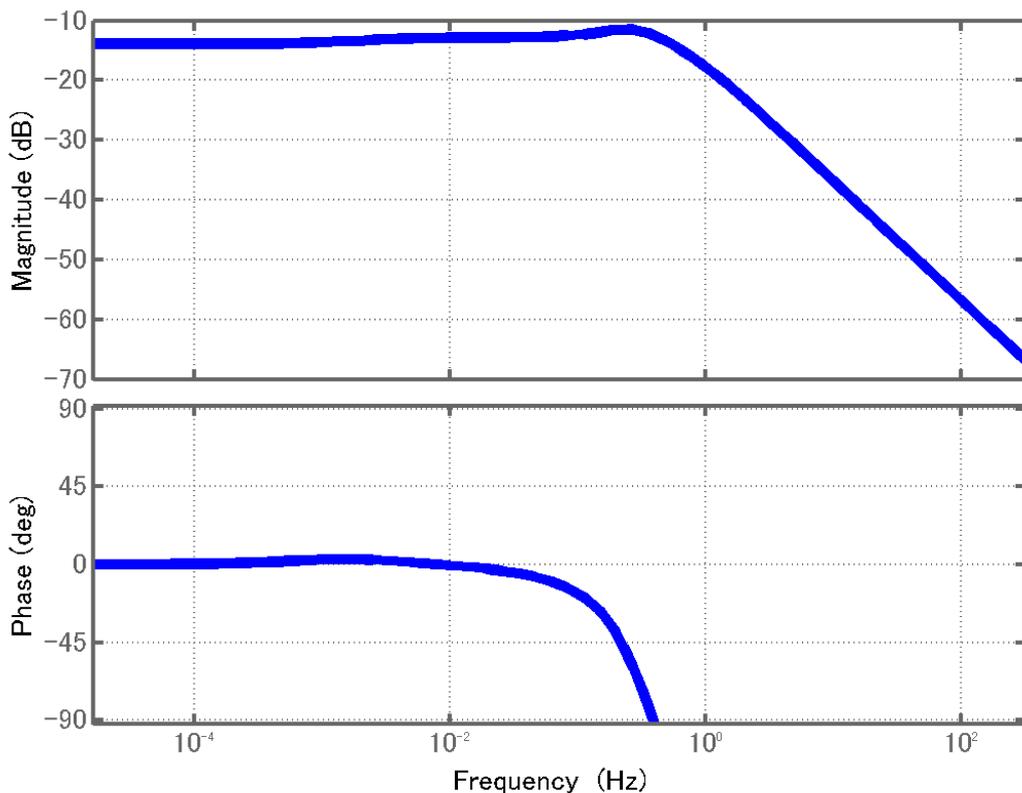
$$\dot{v}_3 = (q_2 - q_3) + (q_4 - q_3)$$

$$\dot{q}_3 = (q_2 - q_3) + (q_4 - q_3)$$

$$+ (v_3 - v_2) + (v_3 - v_4)$$



## ボード線図



## 正実

スカラー伝達関数  $g(s)$  が条件

- ・極の実部が正でない
- ・位相が  $\pm 90^\circ$  を超えない
- ・全ての純虚数極が一位の極で、留数が負でない

を満たすとき  $g(s)$  は正実であるという.

## 受動性の十分条件

伝達関数  $g(s)$  が最小状態空間表現

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

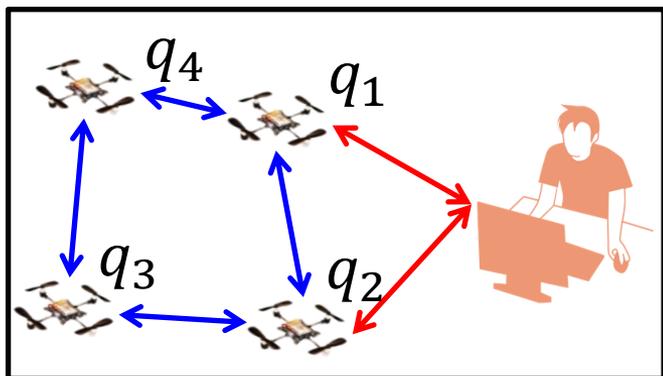
で実現されるとき,

伝達関数  $g(s)$  が正実であることは  $H$  が受動的であることを意味する.

受動的とは言えない



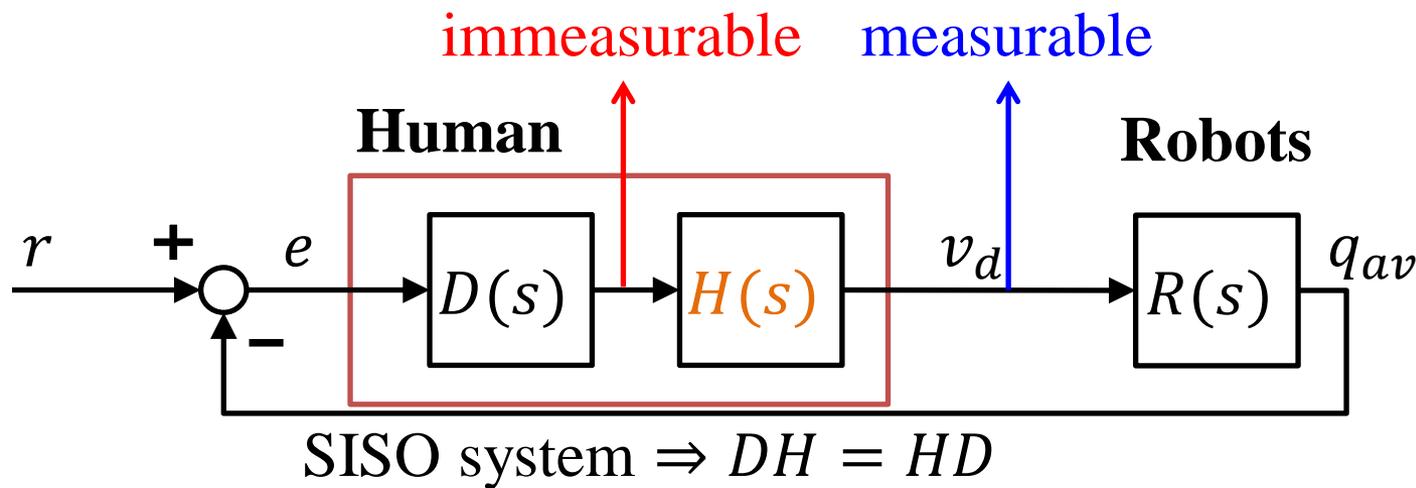
# シミュレーション設定



$D(s)$ : Time Delay

$$q_{av} = \frac{q_1 + q_2}{2}$$

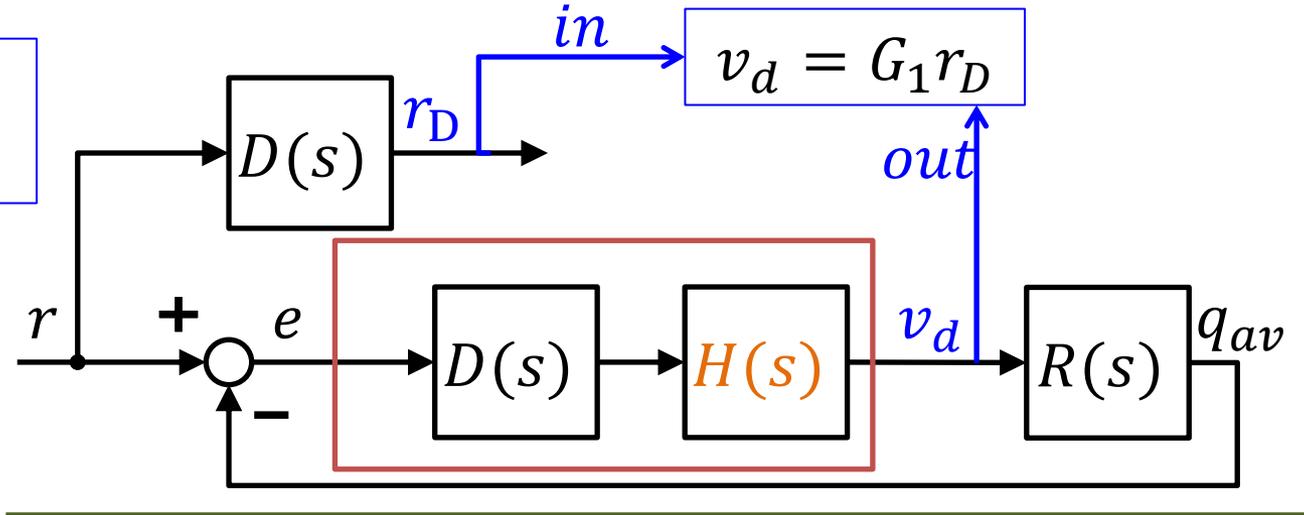
$$R(s) = \frac{s^2 + s + 2}{s^3 + 2s^2 + 4s}$$



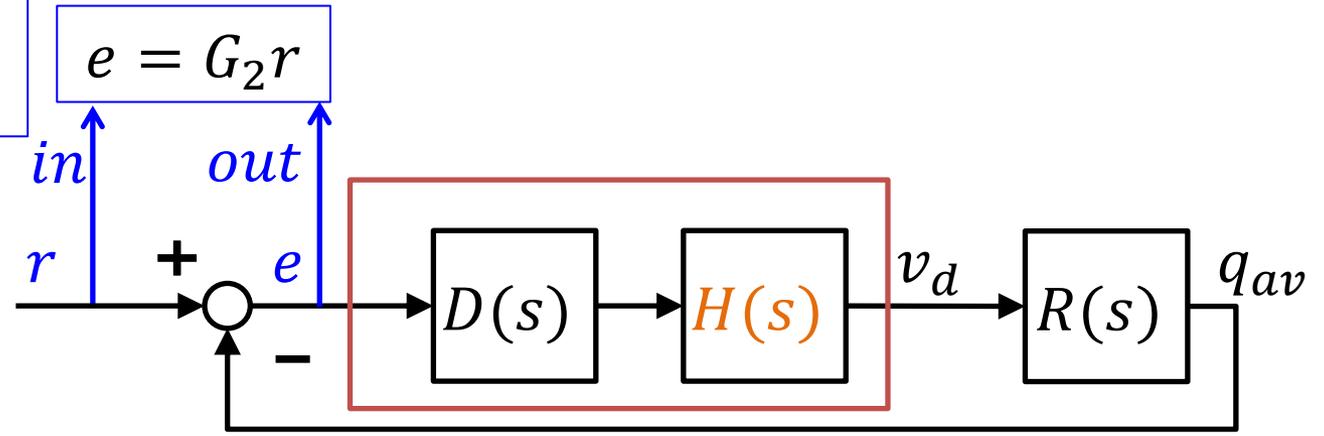


# H(s)の同定方法

$$G_1(s) = \frac{H}{1 + RHD}$$



$$G_2(s) = \frac{1}{1 + RHD}$$

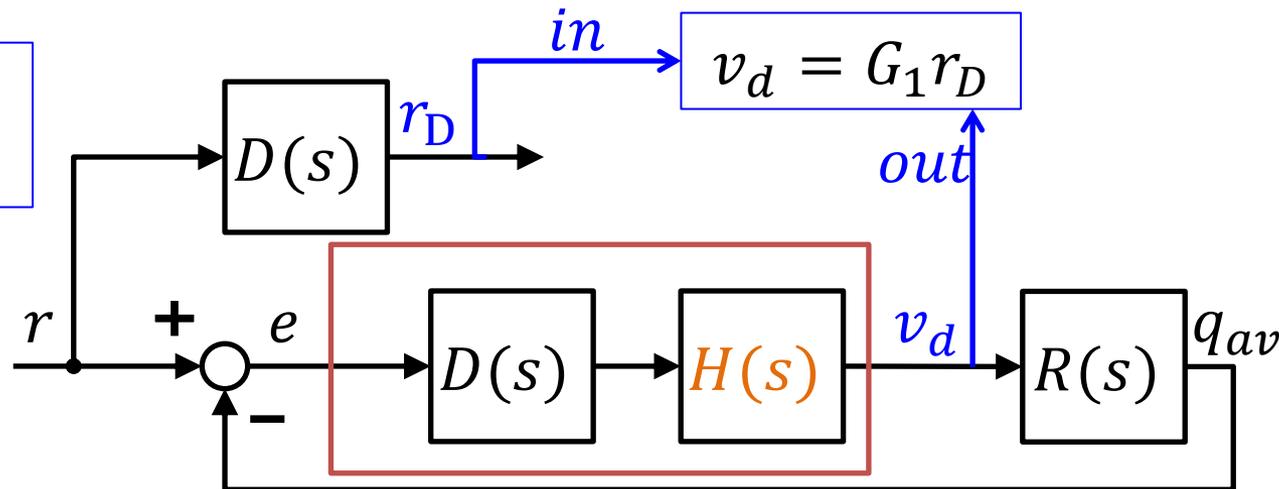


$$H = \frac{G_1}{G_2}$$



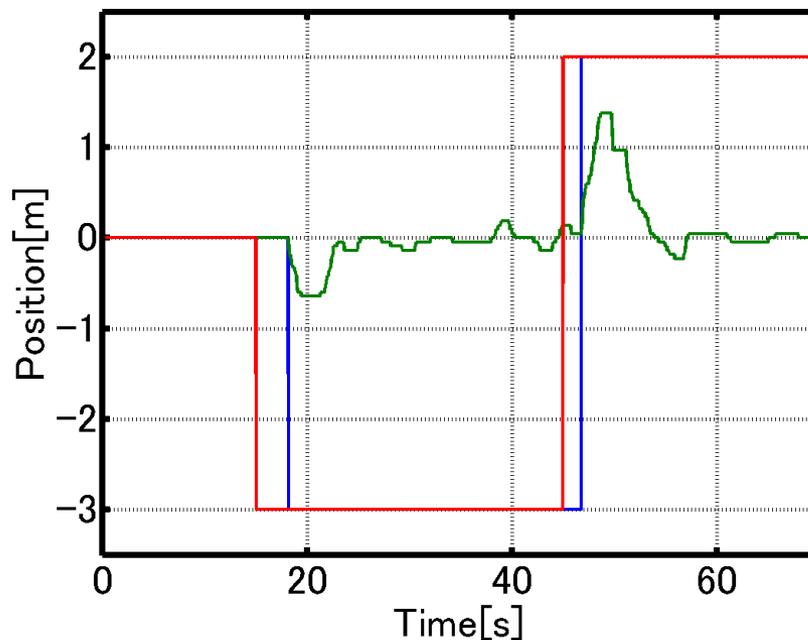
# H(s)の同定方法

$$G_1(s) = \frac{H}{1 + RHD}$$



赤線:  $r$

青線:  $r_D$



Velocity [m/s]

緑線:  $v_d$