
ヒトの運動制御のモデル研究

人間福祉テクノロジー研究ステーション
研究セミナー 第7回

担当: 情報システム学研究所
人間情報学講座
阪口 豊

構成

- 自己紹介
 - 研究の履歴
- ヒトの運動制御研究に対する思い
- 進行中の研究の例
 - 間欠的運動制御モデル
 - 可聴化システム

自己紹介：研究履歴 1

- 大学院時代：視覚運動変換の学習モデル
 - 脳内空間地図の自己形成モデル
 - 上丘の眼球運動地図, 頭頂連合野での座標変換
- 助手時代：能動性と注意の働き
 - 「感覚統合と能動的認識」
 - 情報論的実験計画としての能動的認識
 - 触知覚における情報の能動性
 - 図形認識における注意の働き
 - 運動制御における能動的な視覚情報獲得



自己紹介：研究履歴 2

- 電通大(前半)
 - 視知覚メカニズム：知覚体制化と注意の関係
 - 図地反転現象における注意移動モデル
 - 知覚的充填現象に関する系統的な実験
 - 「主観的な信頼度」に基づく運動モデル
 - 信頼度に基づく運動計画モデル
 - 信頼度に依存した運動学習モデル(切替と適応)
 - 信頼度に基づく適応的探索
 - 自発的な学習モデル
 - 能力向上率に動機づけされた学習モデル



自己紹介：研究履歴 3

- 電通大(後半)
 - 脳の運動制御のモデル
 - 脳の情報表現・**身体性**の制約を考慮した運動制御モデル
 - スパース表現, 表現単純性, シナジー
 - 脳神経活動の情報量解析
 - 運動関連領野の神経活動に含まれる情報時間変動の解析
 - **より実態に近いレベルの運動制御のモデル**
 - 運動の時間分節とフィードフォワード制御
 - 感覚情報処理も包含した運動制御
 - 技能習得のモデル, 技能習得の支援

ヒトの運動制御

- 運動制御における「ヒトらしさ」とは？
- 身体性
- 個体の主観

身体性と運動制御

- 身体性: 人間自身の特性がもたらす制約
 - 物理的制約
 - 神経系における伝達遅れ,
 - 筋の収縮特性, 力学的特性
 - 筋骨格系の構造, 多自由度系
 - 情動的制約
 - 情報表現の単純性(エネルギー, 記憶容量, 表現)
 - 脳情報処理の時間遅れ(神経力学)
 - 計算のゆらぎ, ばらつき(神経力学による計算過程)

人間の運動制御メカニズムを特徴づけるはず.

主観に依存した運動制御

■ 主観

- 物理的には同じであっても個体に依存する要素
 - 文脈・コンテクスト, 事前情報 : 先験確率
 - 信頼度, 対象・将来に対する確信, 自信 : エントロピー

■ 「信頼度」に依存した運動計画, 意思決定

- 信頼度とは内部モデルへの確信度
- 信頼度と許容リスクに依存した適応的な運動計画
- 情報量に基づく感覚情報獲得
 - 注意の移動, 感覚情報への依存度の変化

間欠的制御モデル

- 問題意識
 - 脳は遅い処理系を使っていかにして連続的な運動課題を実時間で実行しているのか？
- 仮説
 - 連続時間を離散的な時間区間に分節.
 - 分節ごとに予測に基づく前向き制御



着眼点・キーワード

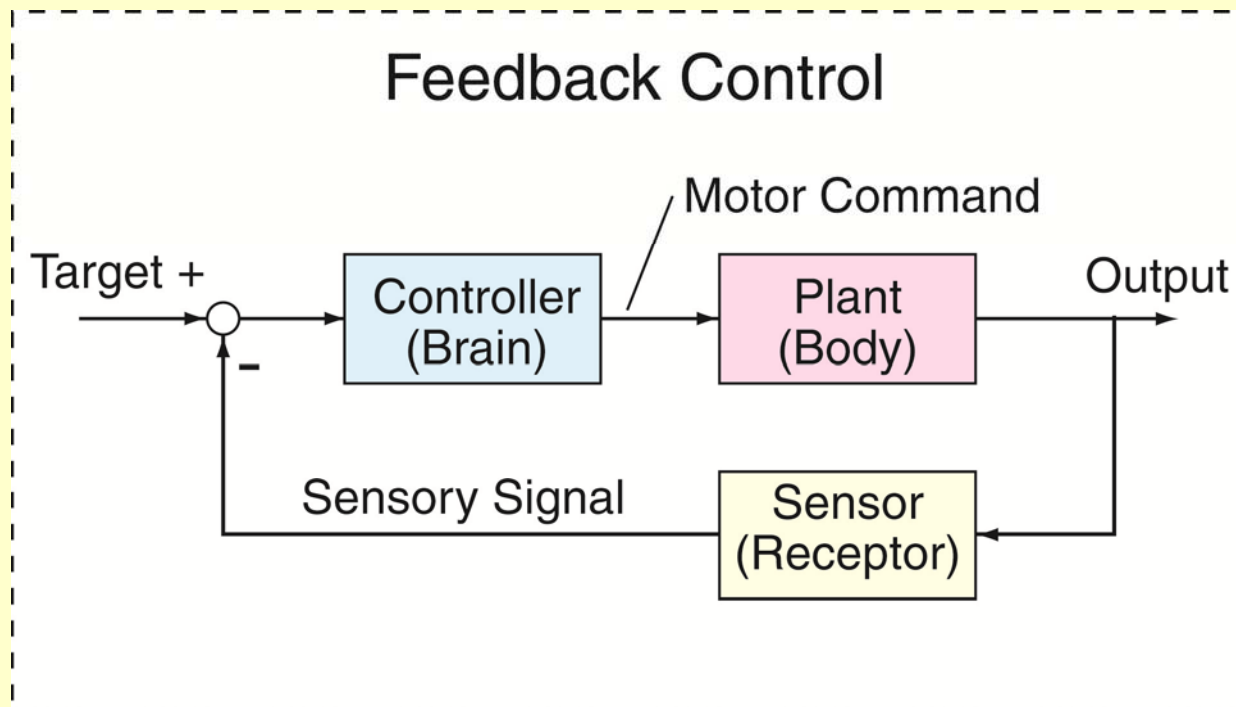
■ 身体性

- 身体や環境との相互作用の下での運動指令生成
- 身体の機械力学と神経力学の時間的整合性
 - 数十～数百ミリ秒の時間スケールでの情報処理

■ 実時間性

- 物理的時間の流れの中での運動指令生成
 - 実装的・時間的制約の下での運動指令生成戦略
 - 望ましい運動制御戦略の自律的な創成→「間欠的制御」
-

身体性がもたらす制御への制約



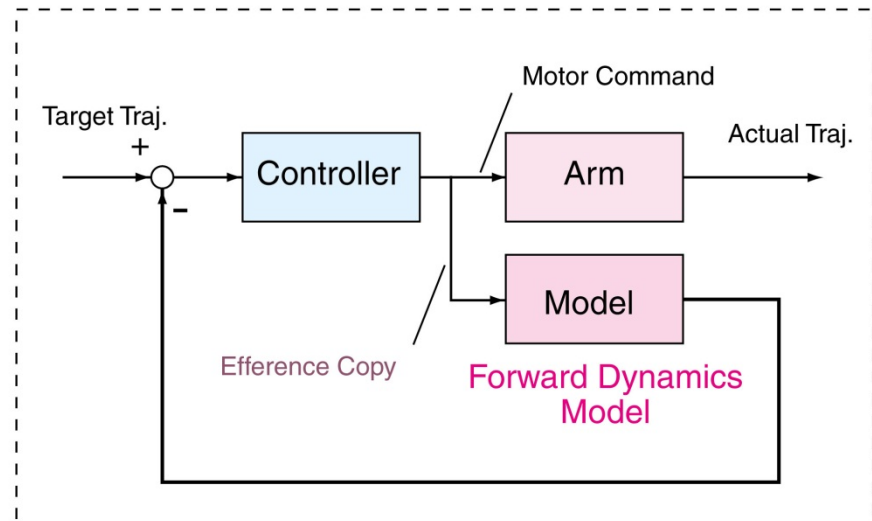
従来の脳計算理論に対する不満

- 個別の運動・身体パーツへの限定
 - 設定した課題条件の中で議論が閉じている.
 - 定常的なモデル
- 実時間性の欠如
 - 指令パターン生成のメカニズムが議論されていない.
 - 「運動しながら指令を計算する」実装感覚が希薄

現実はもっとダイナミックではないのか？

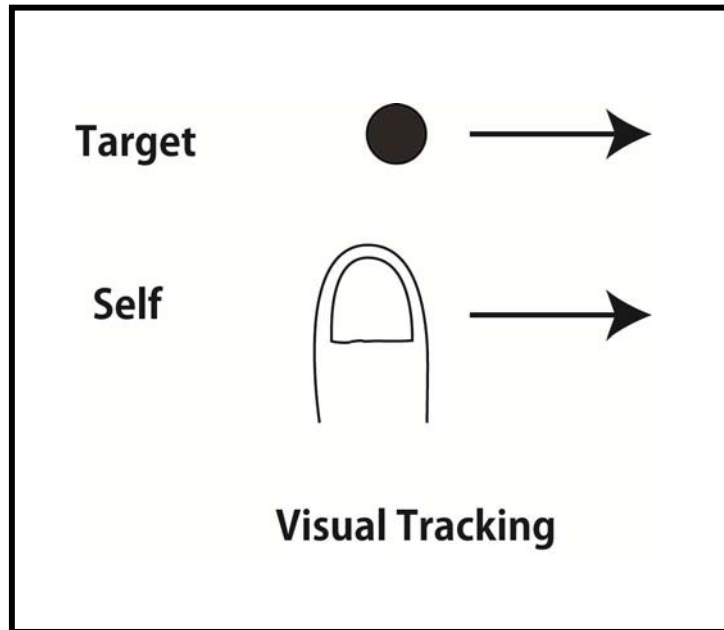
例：到達運動の計算モデル

- 試行単位での運動を対象とする
 - 数百msの運動1回の議論に限定されている.
 - 計算の時間的制約が表面化しない.
- 定常的(静的)な制御モデル
 - 各モジュールが定常的に動作する
仮定

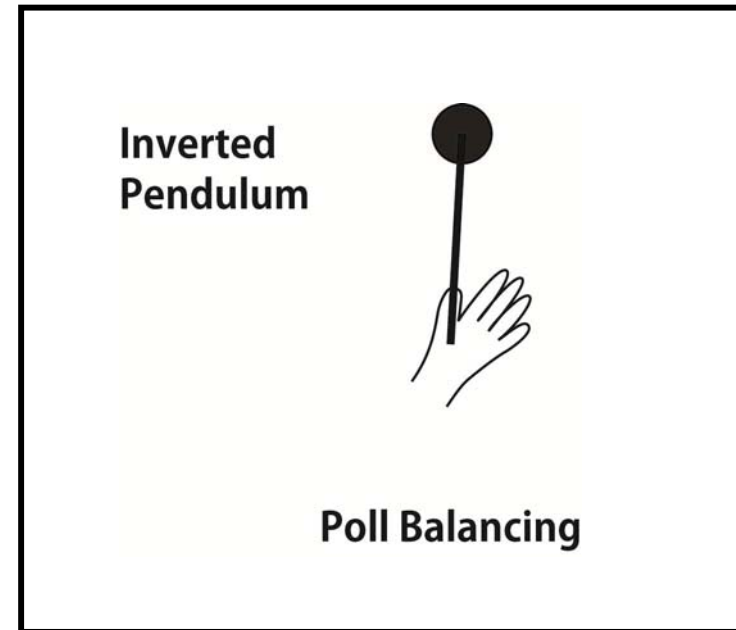


連続的制御課題

目標トラッキング課題



倒立振り子課題

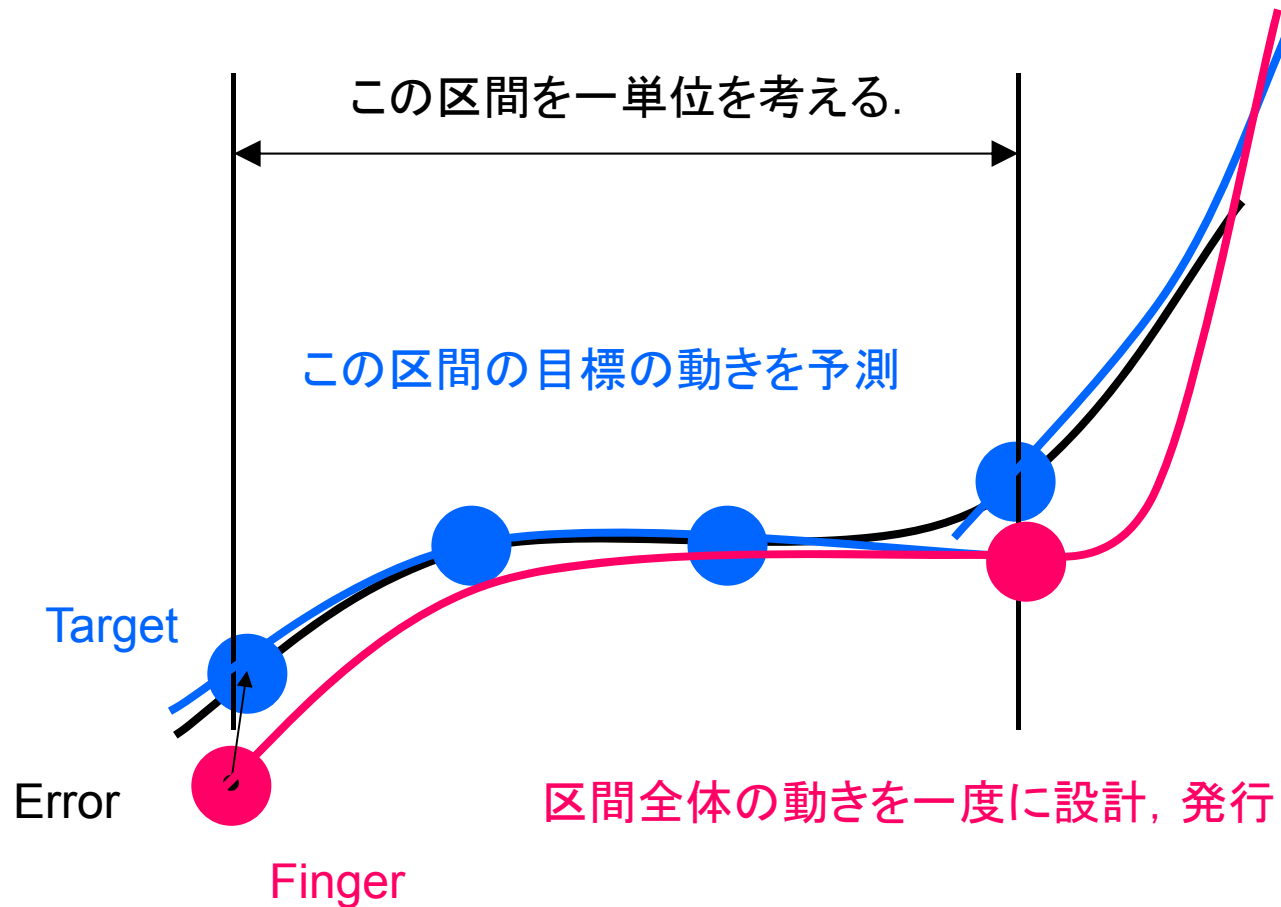


脳が常に運動を計画し続けなければならない設定

間欠的制御(intermittent control)

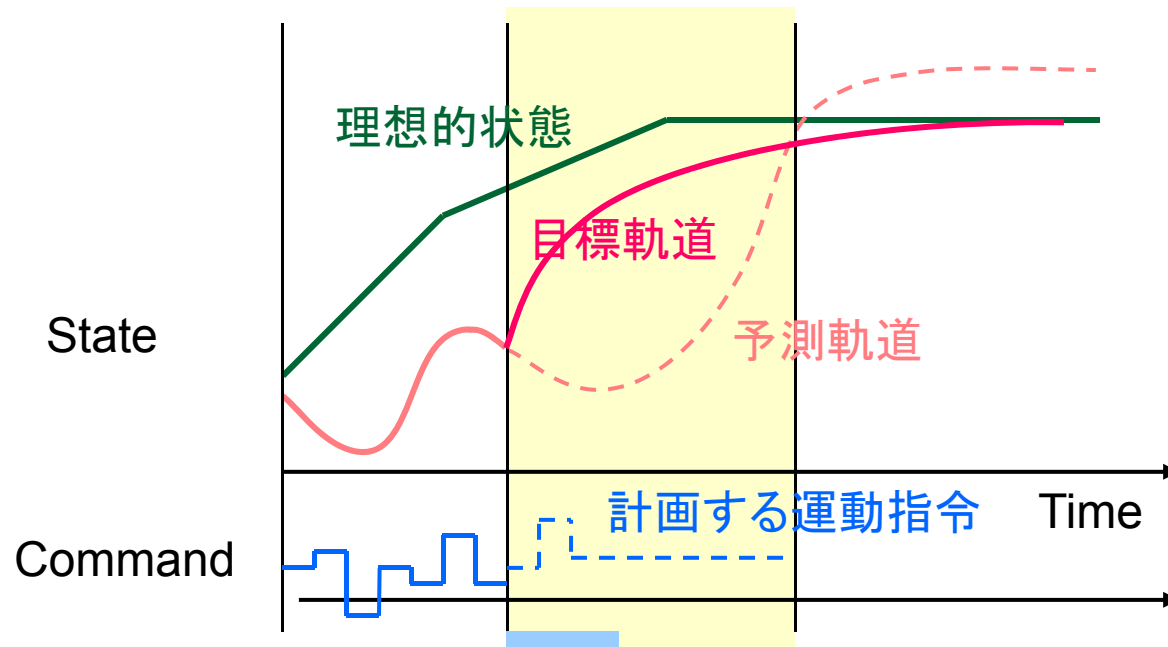
- 連続的運動を時間的区間に分節
 - 条件に応じて適応的に分節長を決定
 - 分節内はフィードフォワード制御
 - 分節内で将来を予測.
 - 分節内で課題要請を満たすように前向き制御.
 - 分節単位でのフィードバック制御
 - 分節単位で非定常的に課題成績を評価.
 - 文節単位で運動指令を決定.
-

課題の分節



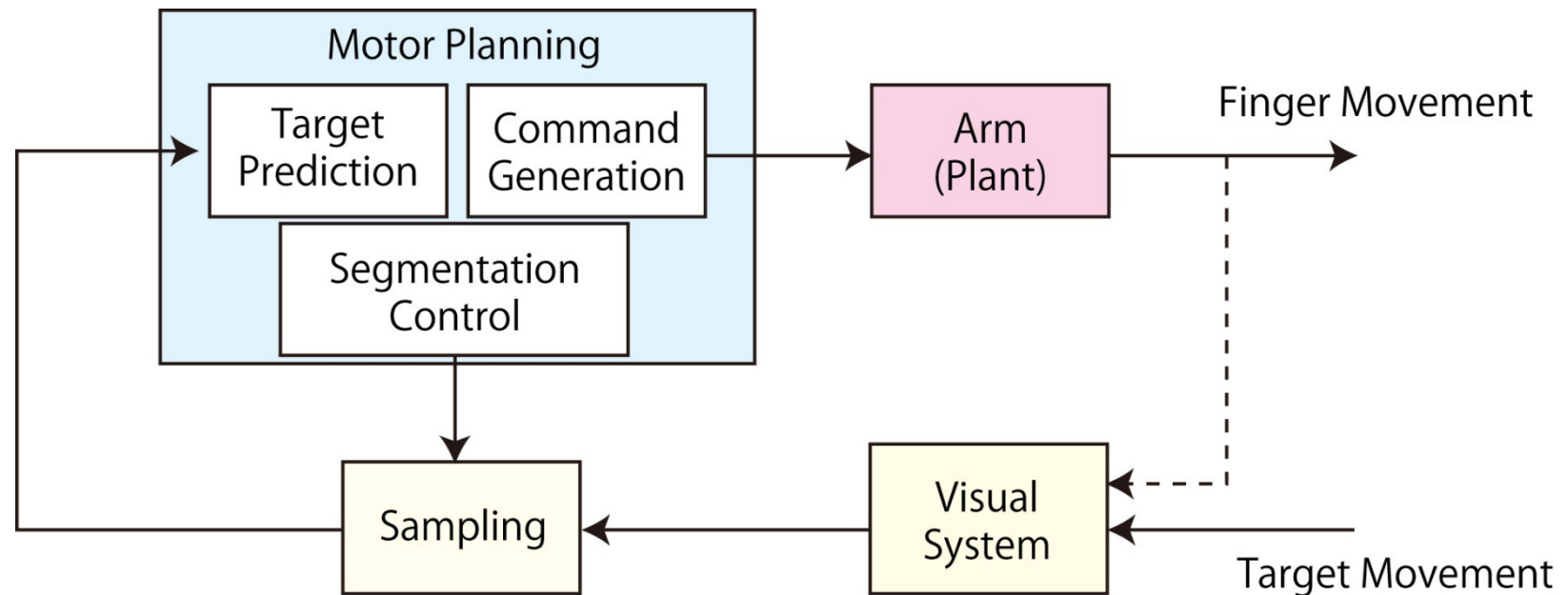
モデル予測制御 (MPC)

将来を予測する範囲(予測ホライズン)



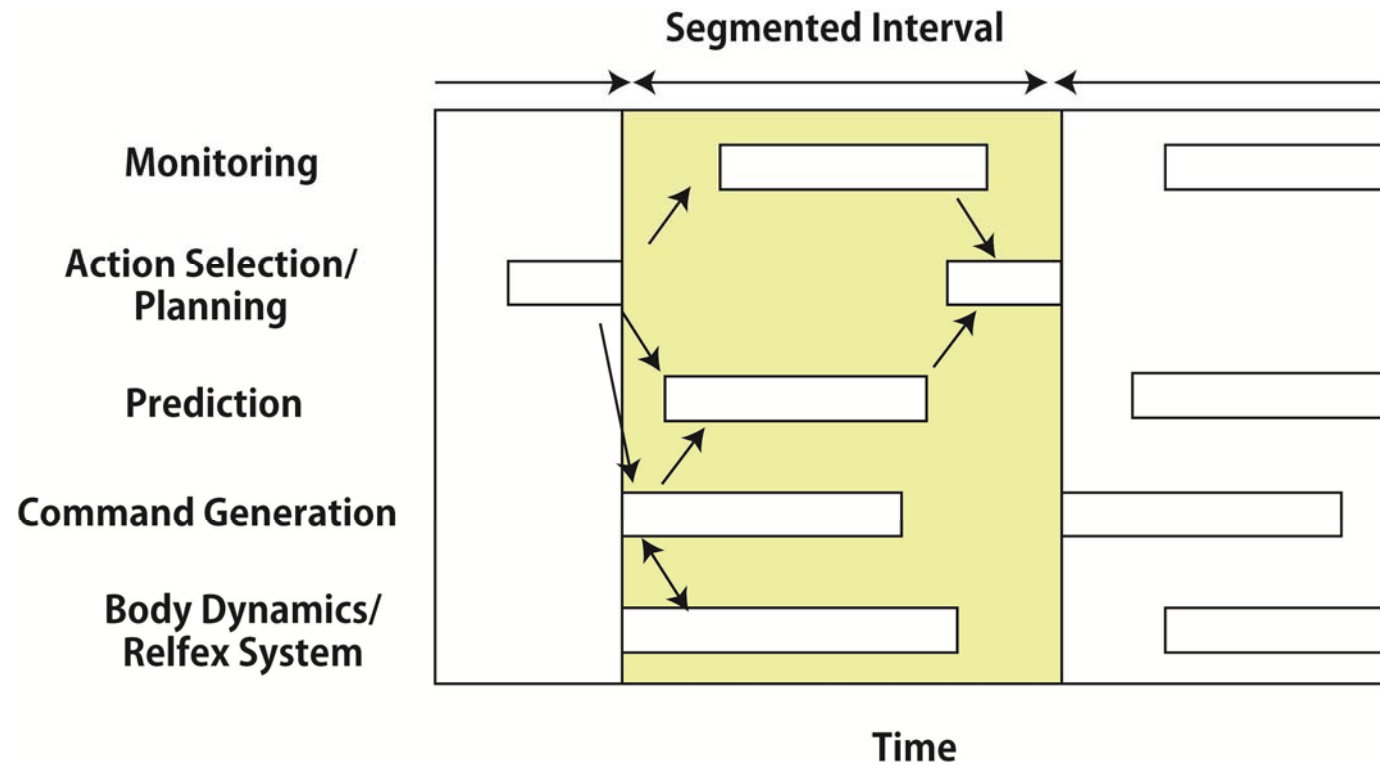
指令を計画する範囲(制御ホライズン)

間欠的制御モデルの構図



システム動作の時間的構造

- 機能モジュールの非定常的な動作



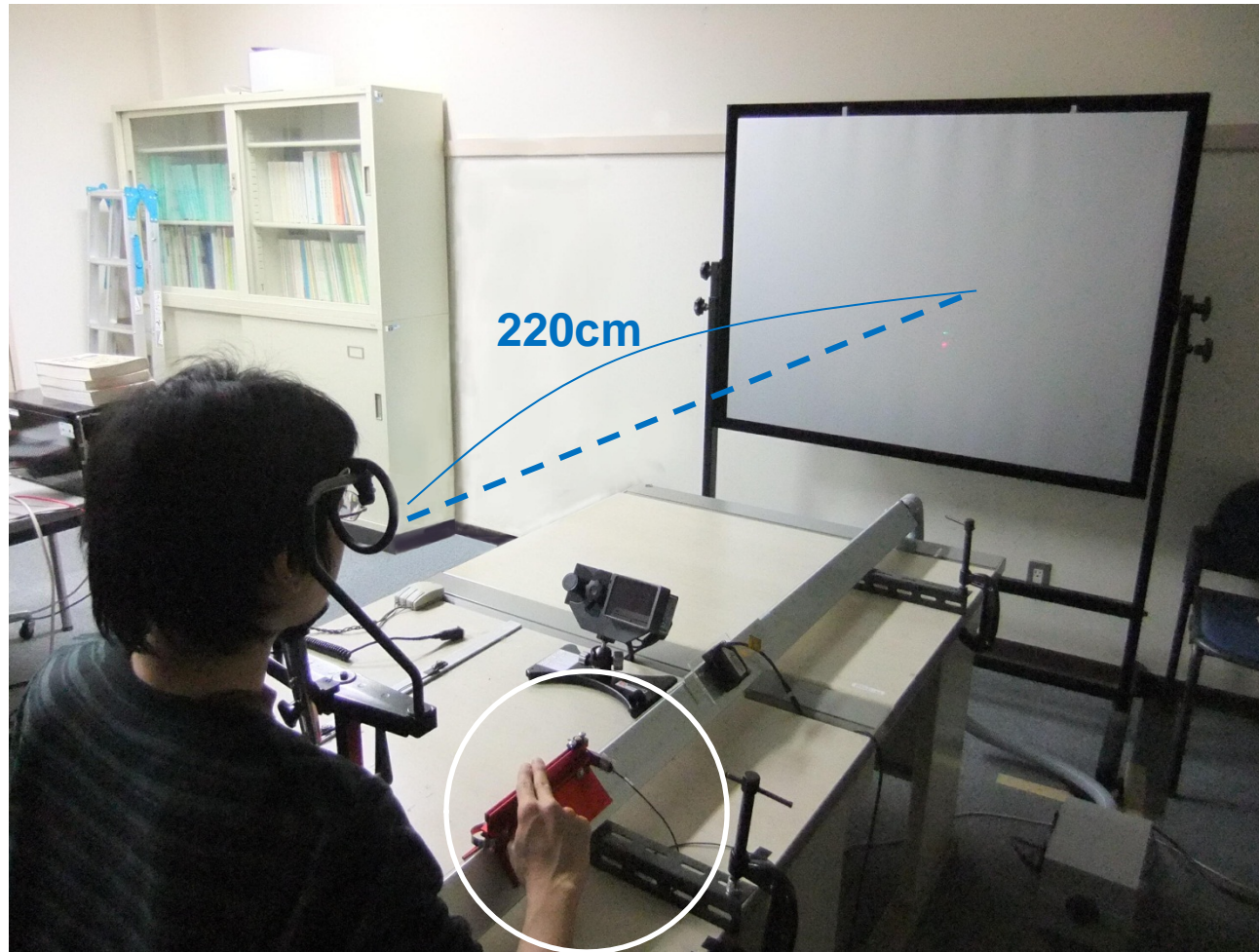
分節を既定する因子

- 課題の予測可能性
 - 目標の動きをどの程度未来まで精確に予測できるか？
 - 自己運動の予測可能性
 - 自己の動きがどのくらい精確に予測できるか？
 - 運動の時間単位
 - 身体の時間特性としてちょうどよい時間はどの程度か？
 - 単一運動計画の限界
 - 一続きの運動をどの程度の長さまで計画できるか？
-

行動実験

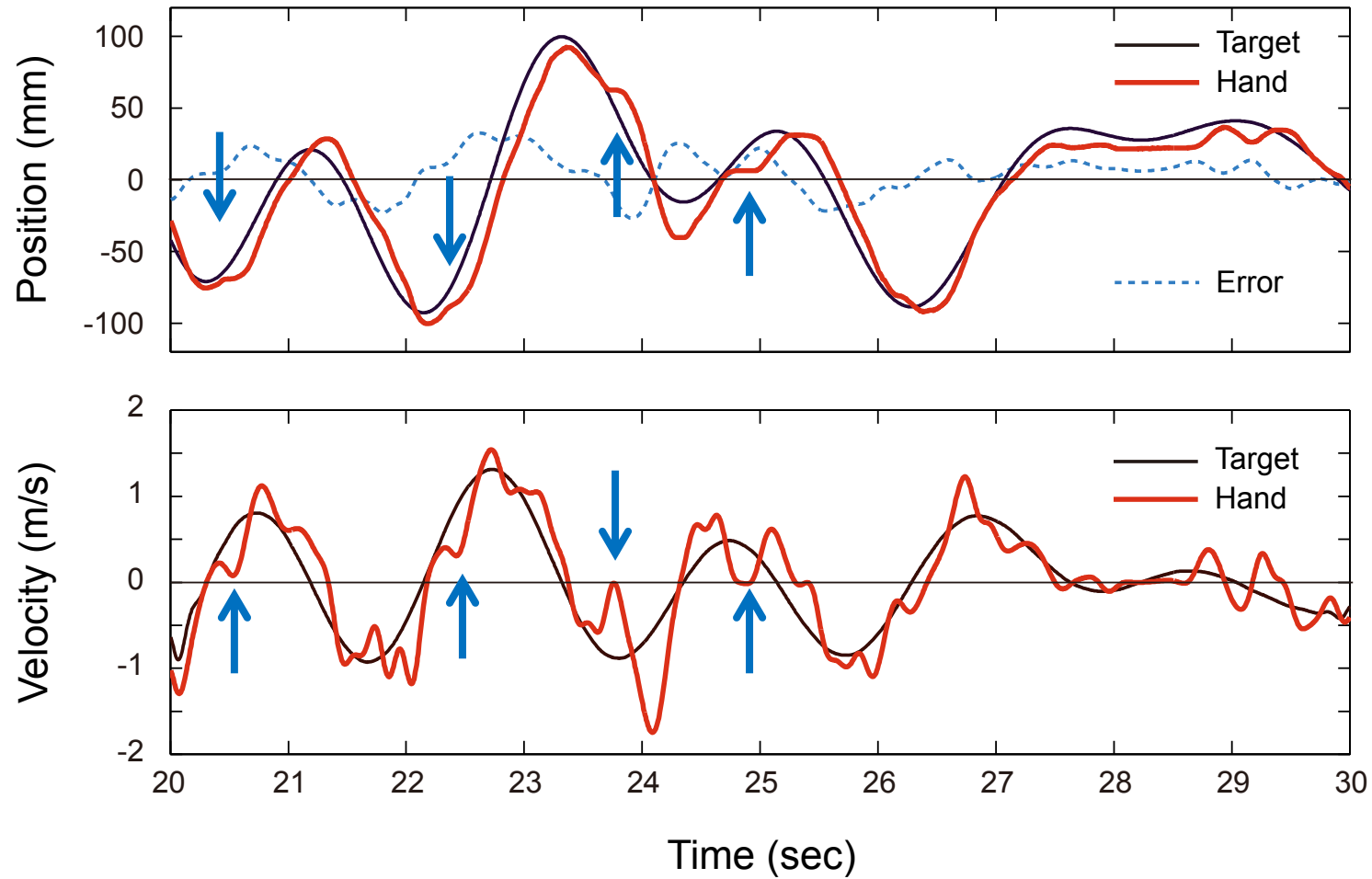
- 視覚目標追従課題
 - 視覚的に与えられた目標の動きを手の運動で追従する.

実験システムの概要



Air-float slider

追従課題で見られる間欠性

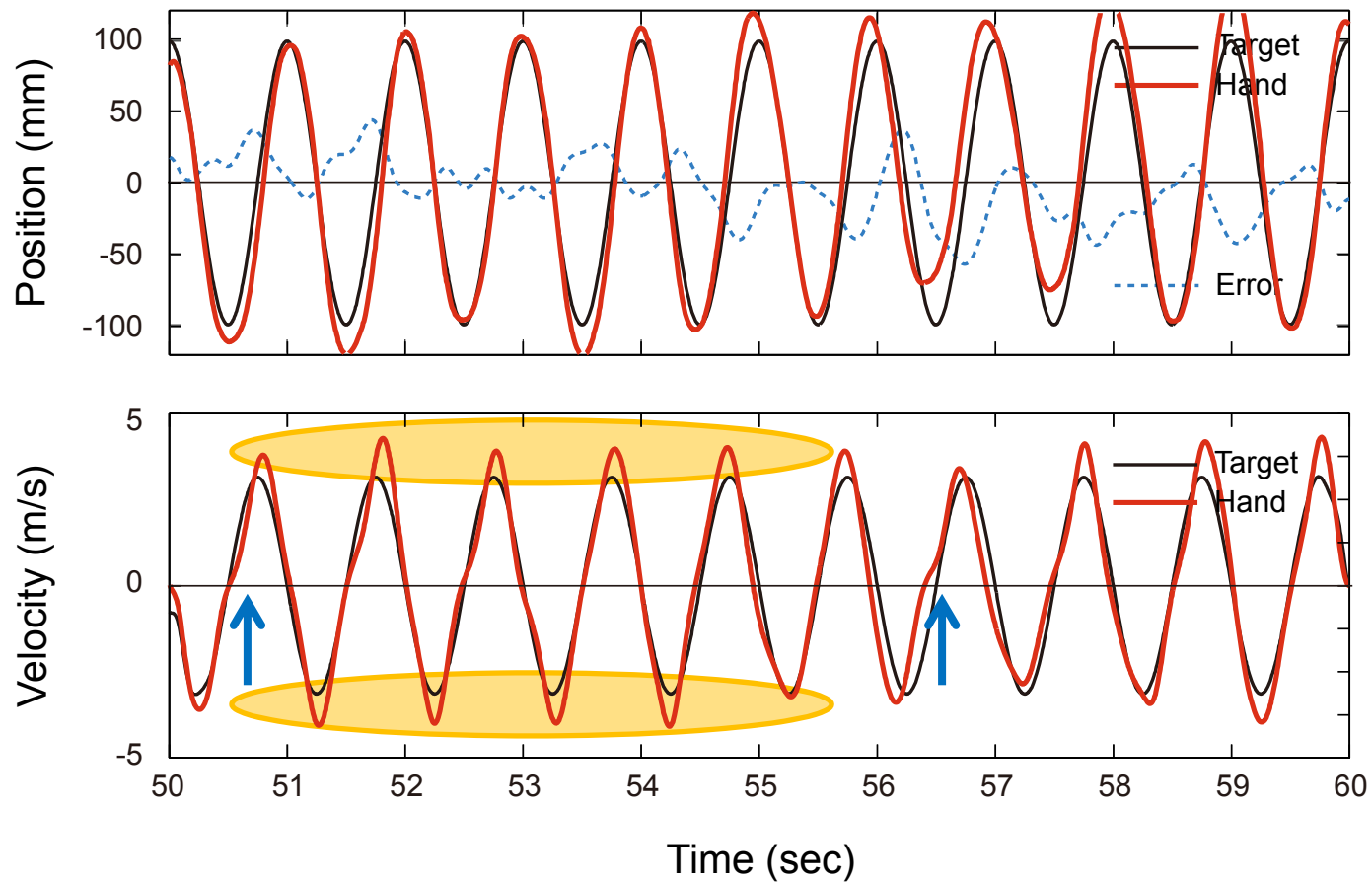


分節の示す特徴

- 分節位置が不規則である.
 - 一定周期ではない.
- 対象の運動と同期していない.
 - 対象が滑らかに動いている最中に分節するケース
- 速度波形はベル型
 - 個々の分節は到達運動に類似？

非定常的に部分運動を駆動している可能性

短周期の周期的運動への追従



分節区切りの性質

- 分節位置, 長さの不規則性
 - 制御系の周波数特性を反映したものではない？
 - 適応的な運動計画の過程を反映している？
 - 先延ばし (waiting / nogo)
 - 積極的に運動しない区間が見られる.
 1. 未来が予測できるまで意思決定を保留する.
 2. 計画した運動の開始タイミングをあわせる.
運動結果の評価, 運動開始のタイミングも非連続的.
-

時間分節と構造の創成

- 時間方向の分節化
 - 連続的な時間の流れを運動単位に分節する.
 - 非一様構造の創成
 - 一様な時間軸から構造化された時間軸が創成される.
 - 分節の単位を規定するもの = 身体性と課題
 - 筋骨格系の機械力学, 脳の計算力学
 - 環境(課題)の要請する時間特性
-

身体運動の可聴化

■ 問題意識

- ヒトは自分の身体の状態について実はよく理解していない。
- 自分の状態を音響信号によって実時間でフィードバックすることで身体感覚への「気づき」を補強する。

Auditory Cues in Daily Life



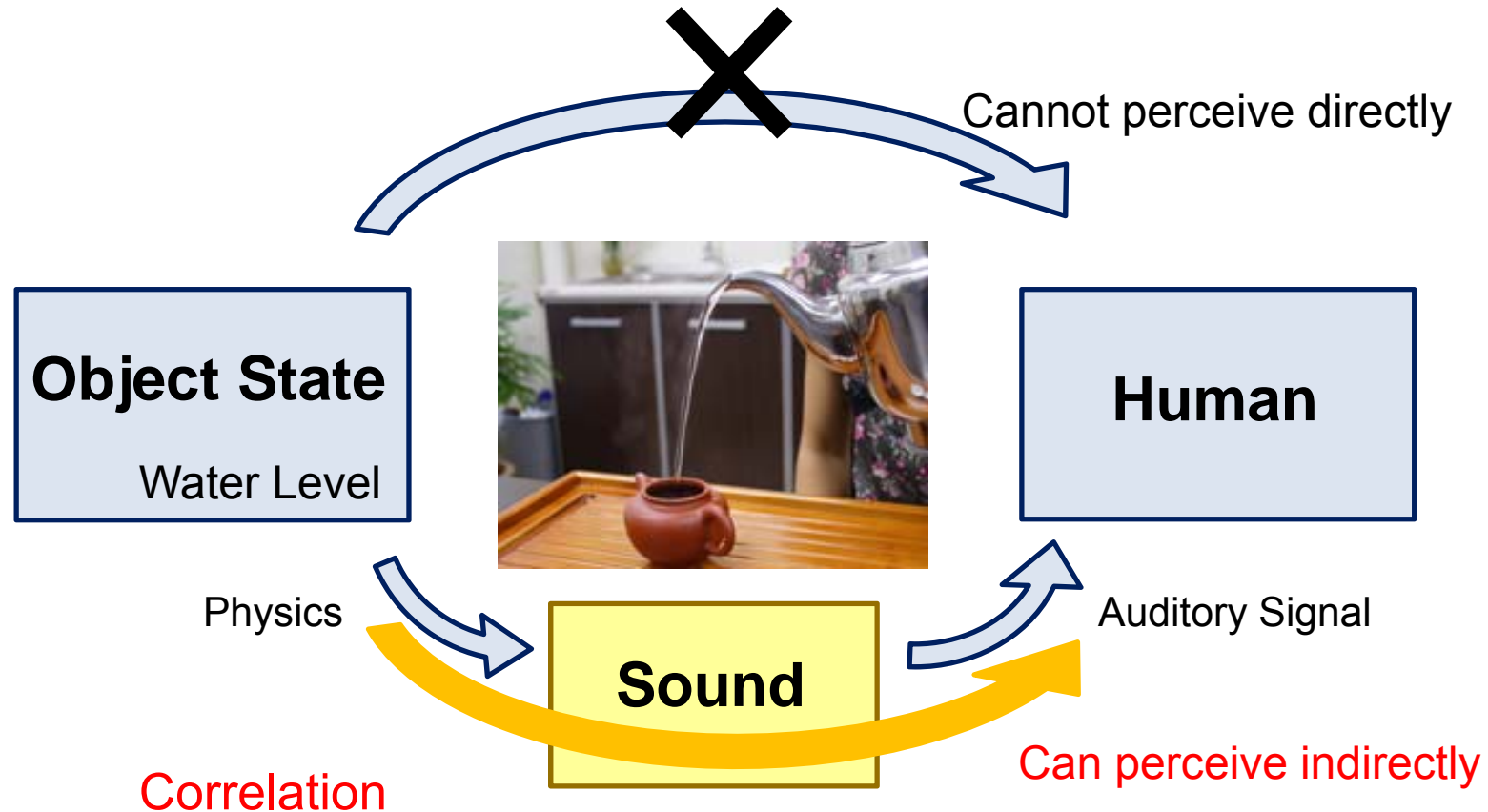
Shaving metal work



Pouring water

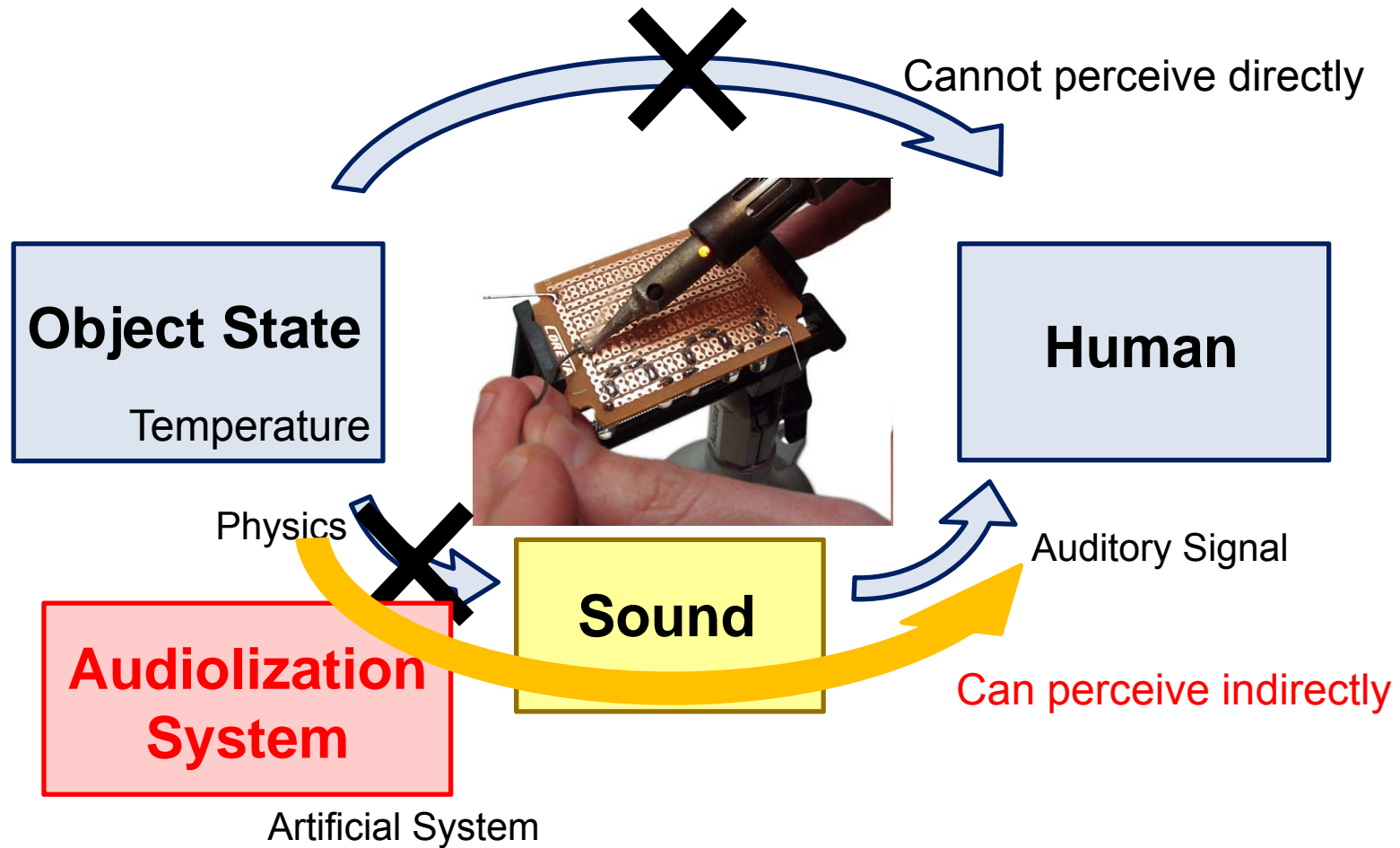


Auditory Cues and Skill Acquisition



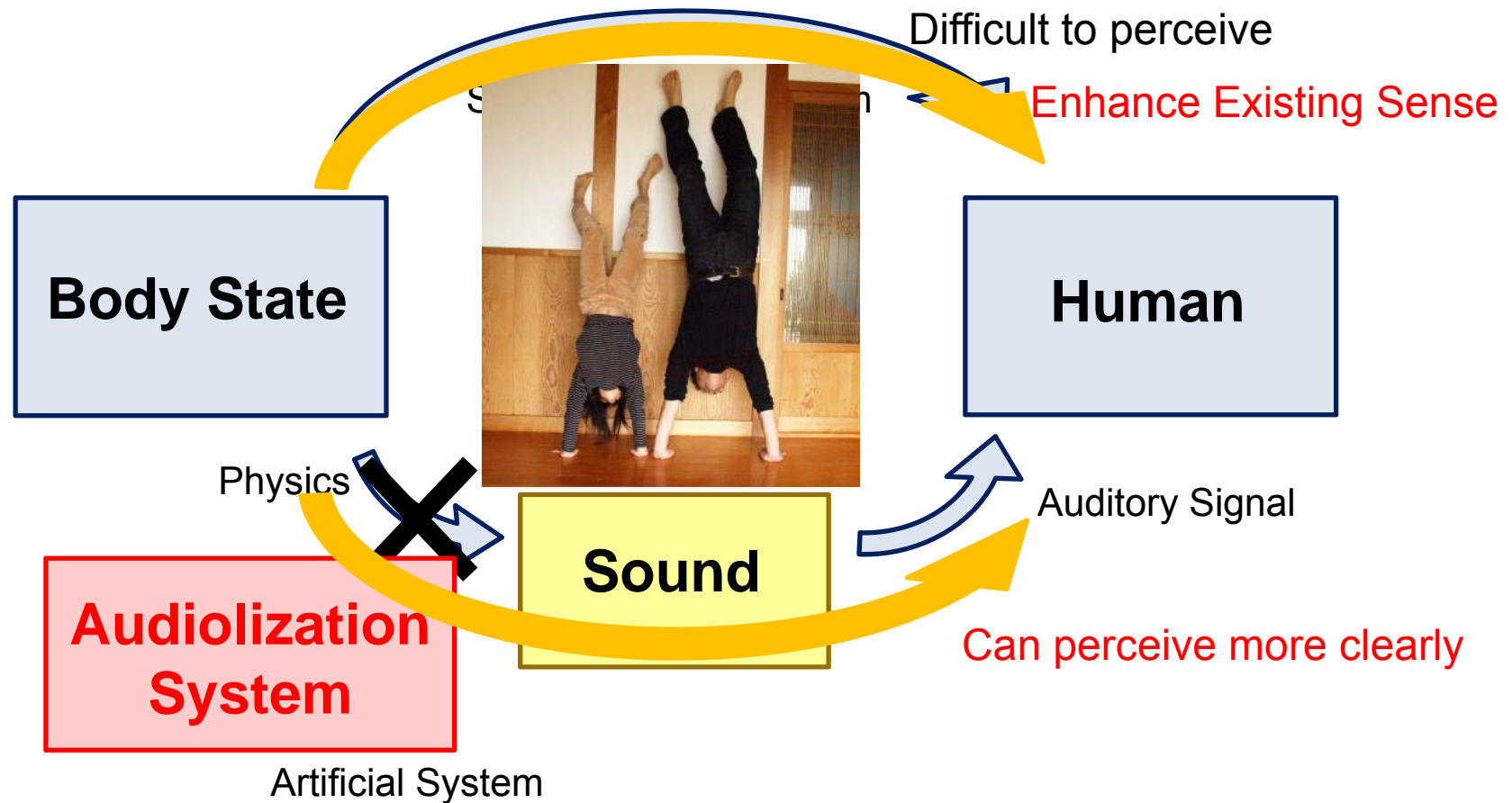
Brain learns the relationship between object state and sound.
Brain can control object state based on the auditory signal.

Audiolization System



Cf. Sonification

Audiolizing Body Movement



Pros and Cons of Visual Feedback

■ Pros.

- Superior in perceiving spatial structure and relationships



■ Cons.

- Restriction of visual field
- Tight Coupling with body movement
 - Vision is not free from the motor control.
 - People has to fixate at some target during the task.
- **No room for accepting additional information**



Auditory feedback

- No restricted “auditory field”
 - Auditory system can receive sound from any direction.
- Vacancy in motor control
 - Sound cue itself rarely determines the motor task itself.
 - Sound hardly interferes with the on-going body movement.
- Superiority in perceiving timing and rhythm.

Auditory system can afford to accept additional information.

Auditory feedback may be helpful in some cases !

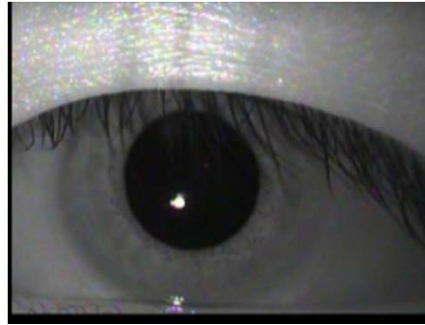
Other Effects of Audiolization

- Externalization of body movement
 - People can perceive the body state more consciously.
 - Movement of two individuals can be compared by sound
- Extension of “Self”
 - People can extend its ability using the additional sense.
- A tool for analyzing art and beauty
 - We may be discuss the relationship between sound beauty and movement beauty ???

Applications



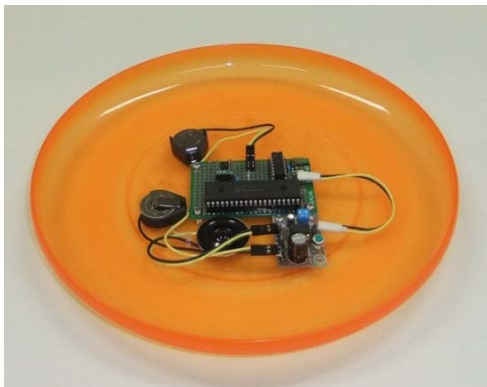
Pole
Balancing



Eye
Movement



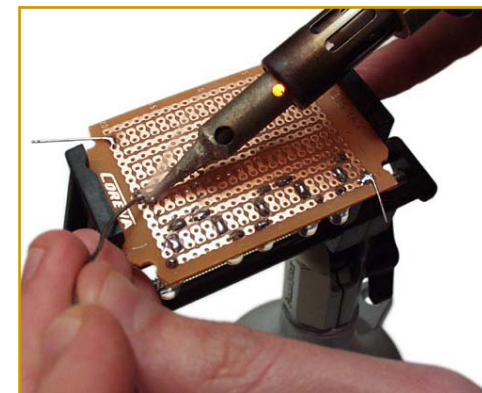
Calligraphy



Frisbee



Walking



Soldering

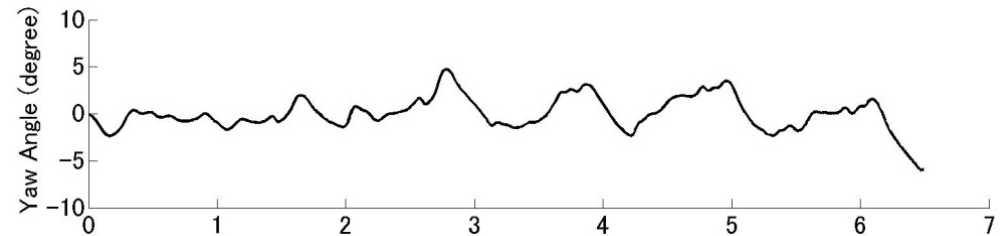
歩行動作の矯正

- 歩行中の腰の回転速度を音にしてフィードバックする.
- 音のリズムから腰の回転の対称性がわかる.

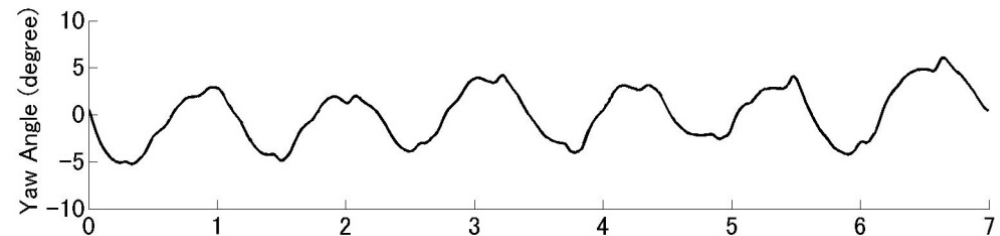


フィードバックの効果

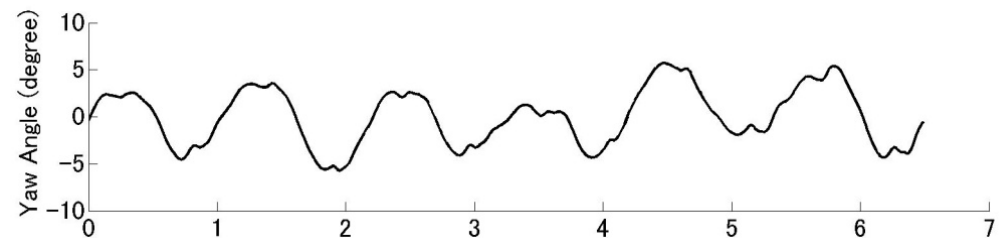
1: フィードバックなし



2: フィードバックあり



3: フィードバックなし (学習後)



その他のテーマ

■ 多自由度性

- 身体運動の協調構造: 効果的な身体の使い方
 - 多自由度性をいかに活かすか?
 - 環境のもつ効果をどう利用するか(重力の効果)
- 現場に近いレベルでの研究
 - 日常生活, 楽器演奏, 舞踊, 職人技における身体の使い方

■ 運動制御における感覚情報・時間情報処理

- 運動の遂行, 学習において感覚情報をどのように利用しているのか, タイミングをどのように定めるのか?

学内共同研究

- 学生の卒業論文指導
- 設備
 - 高速度カメラ (Nac fx6000)
 - 視線計測 (Nac EMR8? EyelinkII)
 - 3次元位置計測装置 (Optotrak3200)
 - 生体アンプ (日本光電, TEAC Polymate)
 - 電気刺激装置 (日本光電)