

2004年3月25日

# スポーツにおける 生体力学シミュレーションと新運動原理

## 運動系シミュレーションチーム

**望月 義幸**

松下電器産業(株)AVコア技術開発センター

**姫野龍太郎**

理化学研究所情報基盤研究部

**大村 皓一**

宝塚造形芸術大学

# スポーツにおける生体力学シミュレーションの意義

## 人工技能：（スポーツ）技能の保存/再現/伝承

人工物上で再現される技能

人工物上で新たに生成された技能

再現・生成結果解析 原理化 伝承

## 生体力学シミュレーション研究

## 人工知能，脳研究

人間が知能を発現するには身体性が重要な役割

スポーツ技能動作：身体的な限界能力の発揮

知能的な限界性との関連？

# スポーツ動作解析における生体力学シミュレーション

## 生体力学シミュレーションの利点

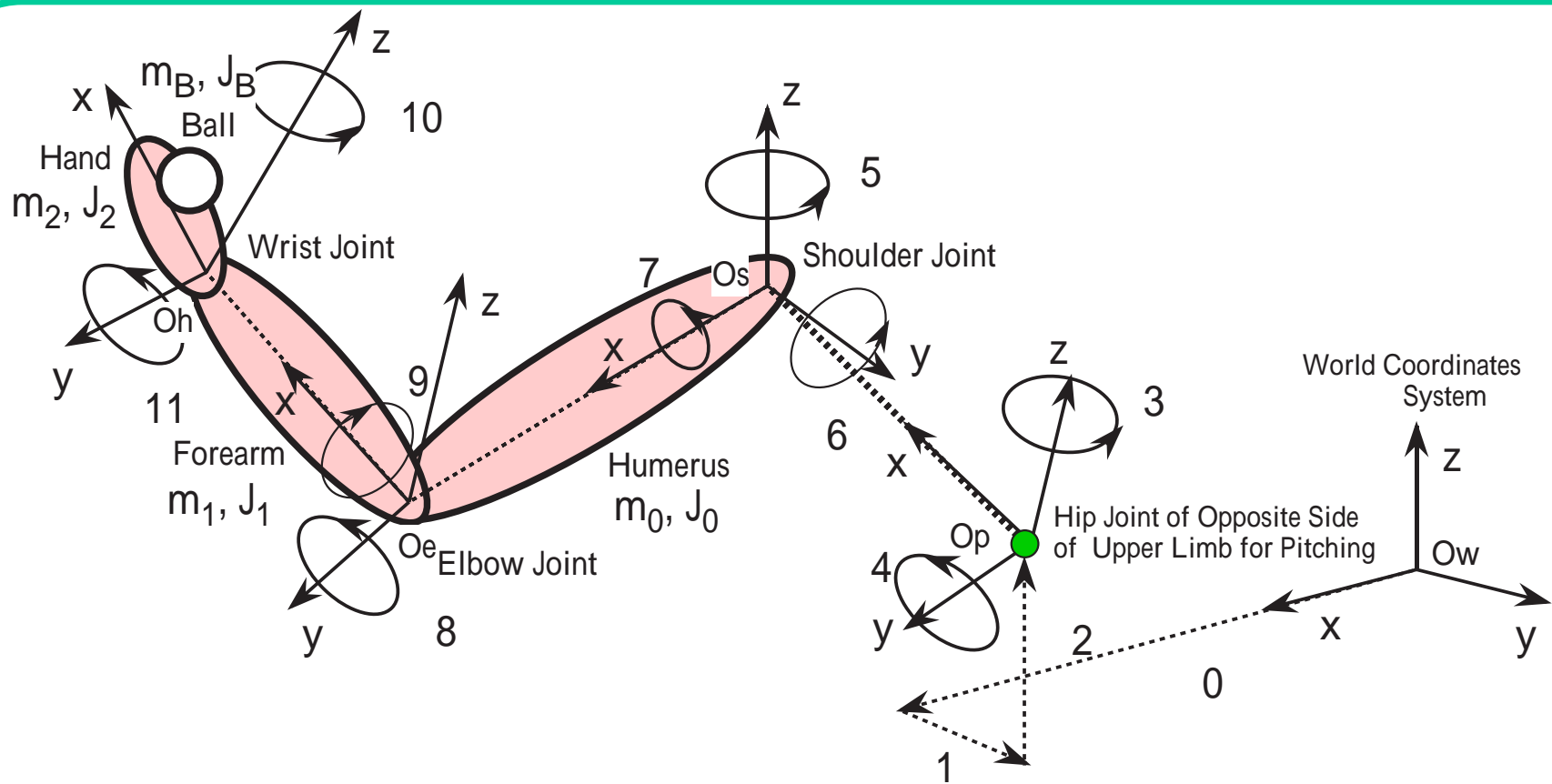
定量的な条件での実験が可能  
身体を損傷するような危険な実験が可能  
動作の再現性を保証した実験が可能  
時空間的な自由度が高い

## 最適化手法



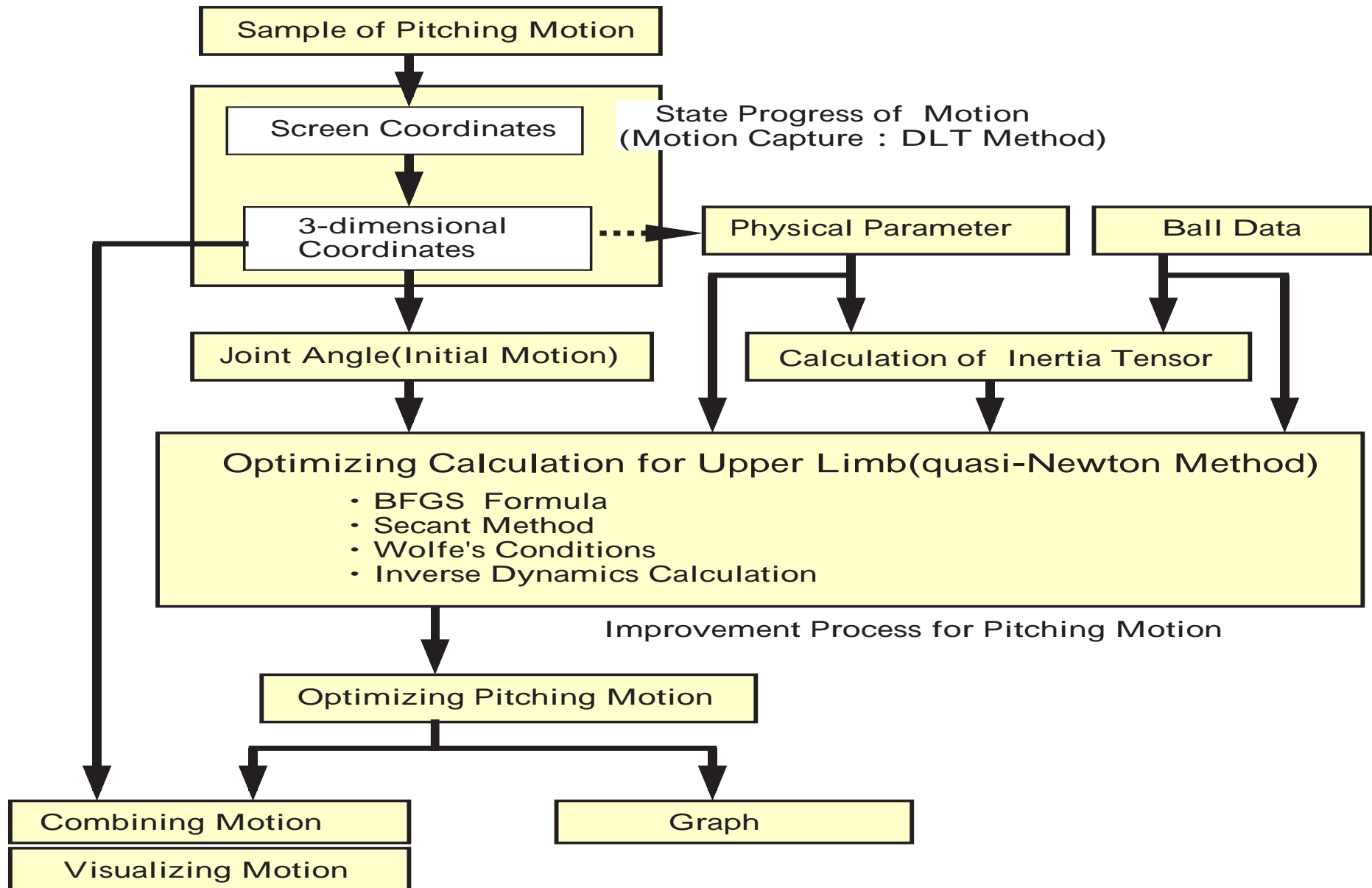
理想動作の生成(人工熟達技能)  
条件の違いが動作に与える影響解析  
(現実に近い予測結果, 被験者に対する実験の危険予測)  
トレーニングによる習熟過程の解析

# Example: 投球における上肢の数理モデル



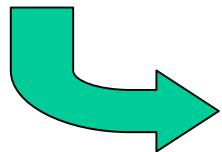
Lagrange運動方程式

# Example: 最適化生体力学シミュレーションの処理



## Example: 目的関数

- **動作の目的に対する達成度**  
競争や勝敗の意味で重要
- **労力**  
体力の消耗, 疲労/疲弊による肉体損傷を小さく
- **動作の滑らかさ** (動力発生 of 滑らかさ / 空間中での軌道の滑らかさ)  
スポーツ障害を防ぐ,  
人間の自然な動作は滑らかさによる最適化原理が働いている (宇野 2002)
- **物理運動としての制限, 運動生理学的な制限**  
最適化動作の現実性, 肉体損傷の回避の保証  
ハンディーキャップ者の表現



**評価要素の定式化 目的関数: 重み付線形和で構成**

# 実施した最適化生体力学シミュレーション

## ■ 投球ボールの要求速度変化解析

投球動作のメカニズム

## ■ 目的関数の重み付けの違いと最適化動作の関係解析

目的関数の違いで様々な投球動作が生成,  
動力発生のはたらきは採用部位の空間軌道の滑らかさを実現

## ■ 投擲角度変化の影響解析

遠投動作のメカニズム: 投擲角度が大, 「リリースポイントが早くなる」, 「スパイラル部の初期: 肩関節のトルクが上肢を後下方向へ移動するように働く, スパイラル部の最下点からは急速に前方へ移動するように働く」

## ■ ボール質量と形状変化の影響解析

ボールの種類で投球動作が2つのグループに分類, 境界に位置するのがソフトボール

## ■ 上肢の質量と形状変化の影響解析

筋肉の増強で投球速度を上げるためには投球動作の改善も同時に行う, 筋肉の増強は投球動作を改善するためのきっかけとなる可能性がある

## ■ 習熟目的の動的変化に対する影響解析

複数の習熟目的を持つ練習: 重視する練習目的の順序も重要, 身体的な要因ばかりでなく, 重視する練習目的の順序が関係している可能性

## ■ バッティング動作の解析

「屈曲-伸展-屈曲」現象に着目し, 動作メカニズム解析: 2つの慣性力である遠心力とコリオリ力が重要で重力の影響は大きくない, 手関節に負担を掛けないバッティング動作の存在を示す

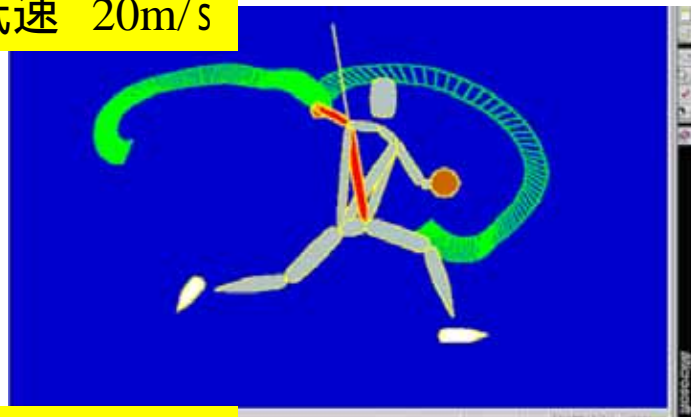
# 要求速度: 高速43m/sの投球動作



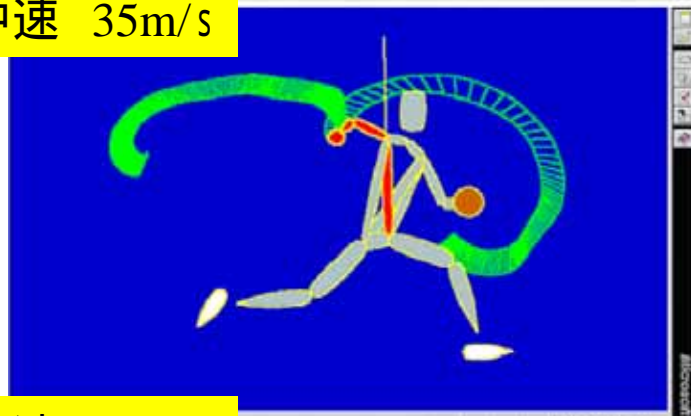


# 投球ボールの要求速度変化解析(1)

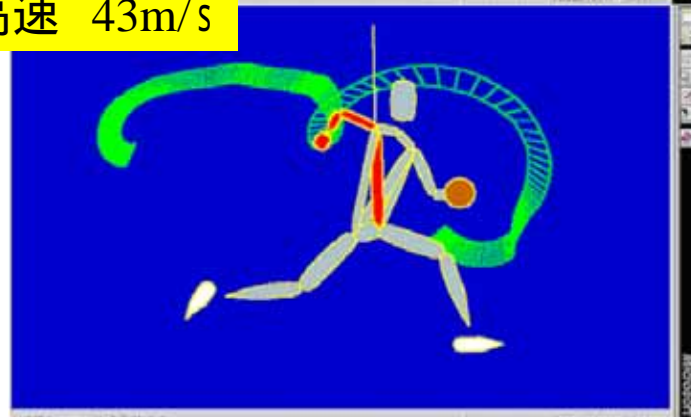
低速 20m/s



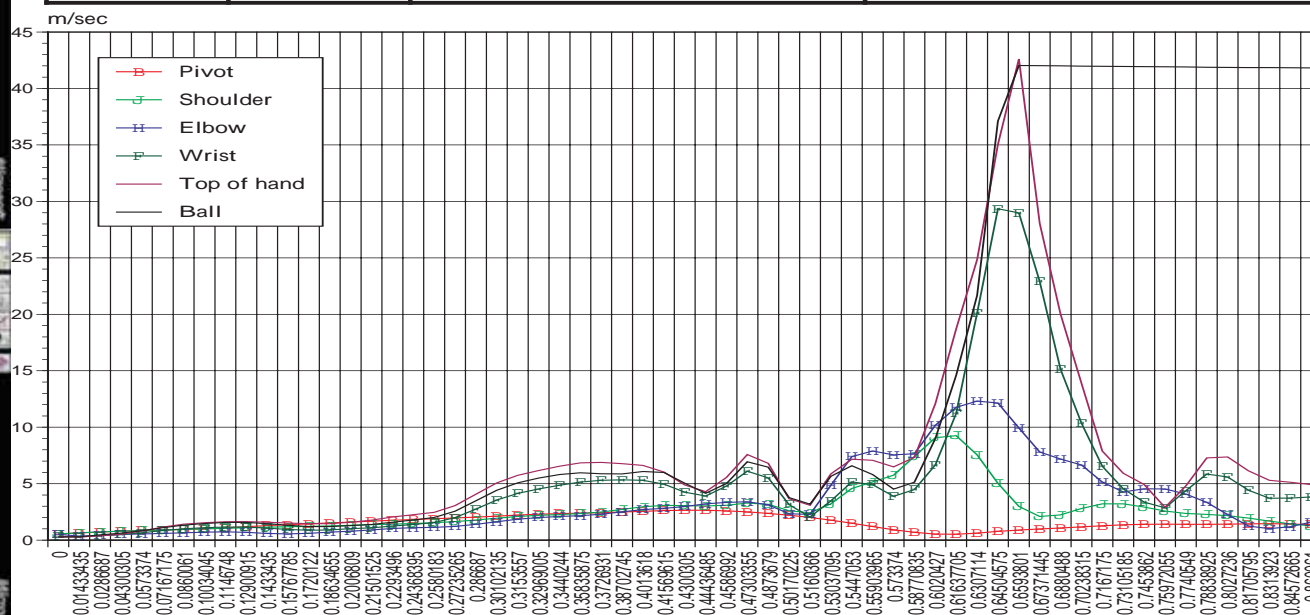
中速 35m/s



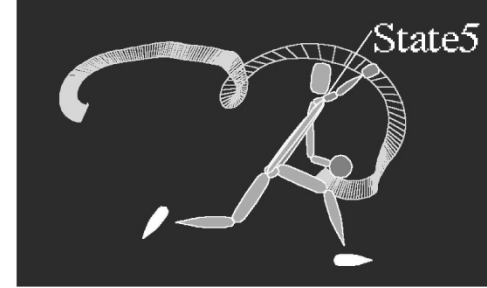
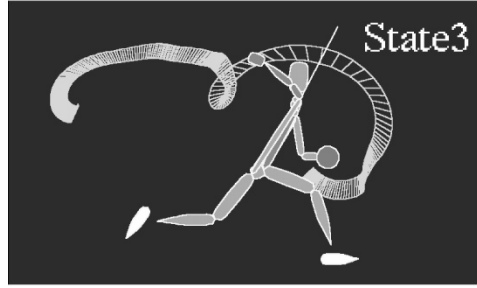
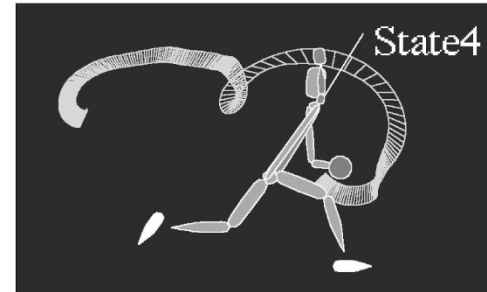
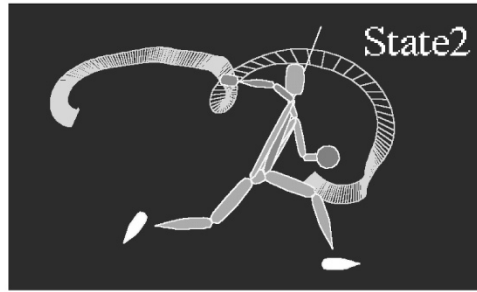
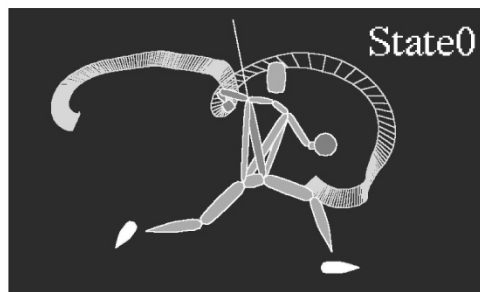
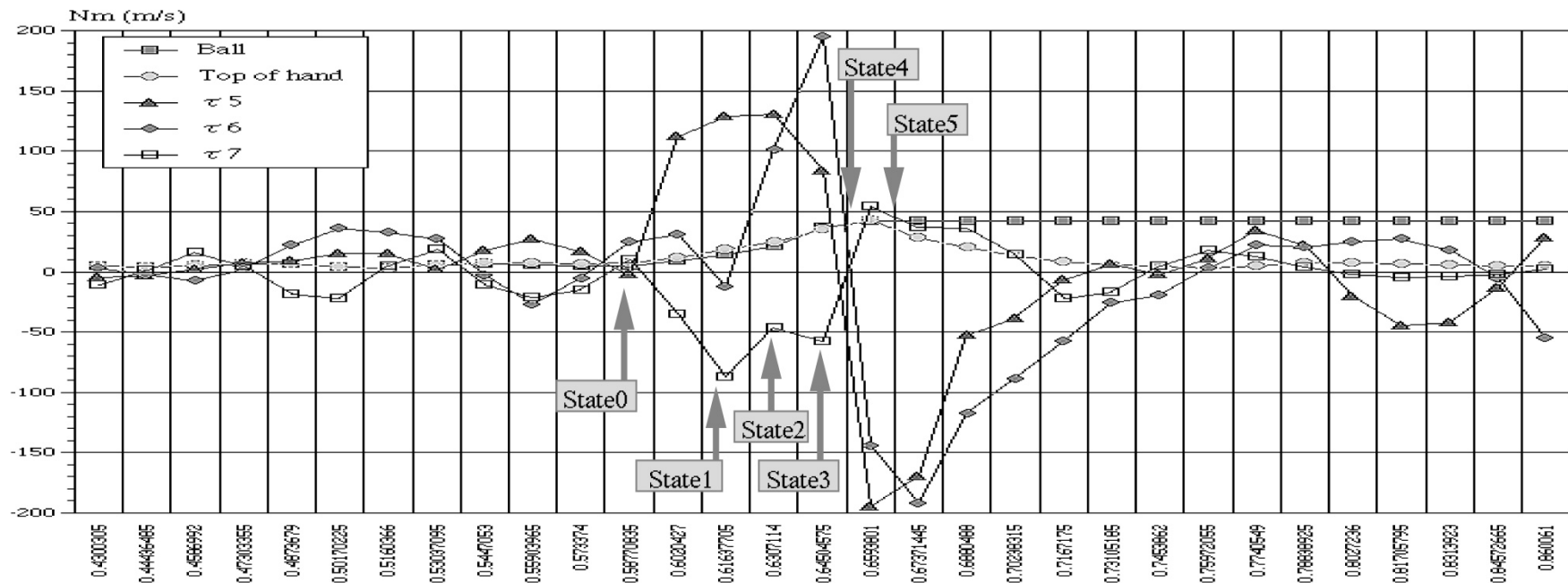
高速 43m/s



最適化条件		ボール速度	肩関節の最大外旋角
条件 A	時刻	0.650741 (sec)	0.613475 (sec)
	値	42.044094 (m/s)	-2.545132 (rad)
条件 B	時刻	0.650741 (sec)	0.579076 (sec)
	値	34.761332 (m/s)	-2.394837 (rad)
条件 C	時刻	0.653607 (sec)	0.579076 (sec)
	値	25.756440 (m/s)	-2.361247 (rad)



# 投球ボールの要求速度変化解析(2)



# 投球動作(スイング動作)のメカニズム

- スパイラル部の生成: 体幹の回転方向とは逆向きの肩関節での外旋, 外転, 水平位外転運動と, その後の体幹の回転方向と合致した方向の内旋, 内転, 水平位内転運動が関与して生じるが, 着目すべき回転運動は, 内 / 外旋運動
- 要求速度の高 ~ 中 ~ 低  
スパイラル部の大小(空間的な軌道における加速区間の距離の長短),  
ボールリリースまでの時間小大  
空間軌道での加速度の獲得
- スパイラル部の滑らか美しさ 空間軌道での加速の滑らかさ

- 投球動作: 肘関節で屈曲して折り畳まれていた上肢が, 肘関節が伸展  
体幹の回転運動の始動に対して, 慣性モーメントが小さな状態から初めて, 伸展によって末端作用部位までの距離を大きくし, 最終的な末端作用部位の速度を獲得している  
末端作用部位の速度獲得を必要とする他のスポーツ動作, 例えば, 槍投げ, バレーボールのスパイク, テニスのサーブ, ゴルフスイング, バッティングなどに共通な現象
- 伸展トルクの獲得:
  - 肘関節の角加速度による回転力(肘関節における自発的な伸展トルクの発生)
  - 体幹の回転運動や水平位の内転運動による遠心力
  - **体幹の回転運動と肩関節の回旋運動とによってコリオリ力(ジャイロ効果)**

# スイング動作の新運動原理

上肢や下肢、バットやラケットなどの道具を振り回すスポーツ動作  
スイング動作(屈曲から伸展に移る現象をリリースと呼ぶ)

## 新運動原理:

スイング動作の3次元的な考察や理解に基づく統一的な議論を可能とする原理

**“コリオリ力がリリース現象の原動力である”**

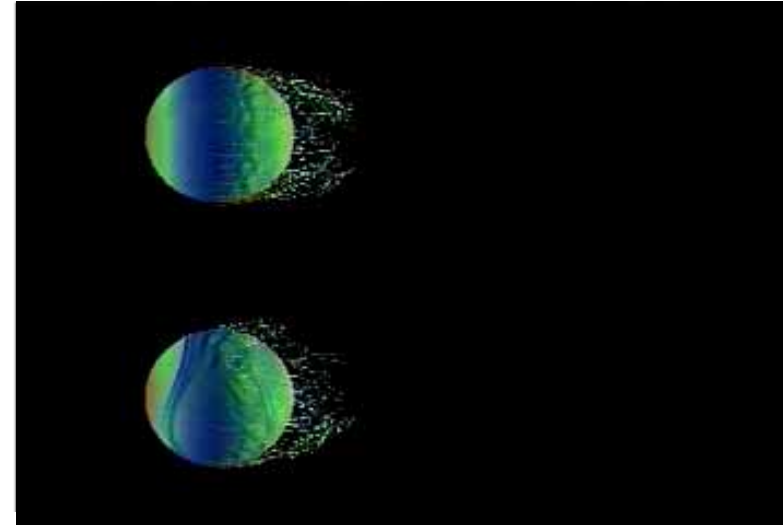
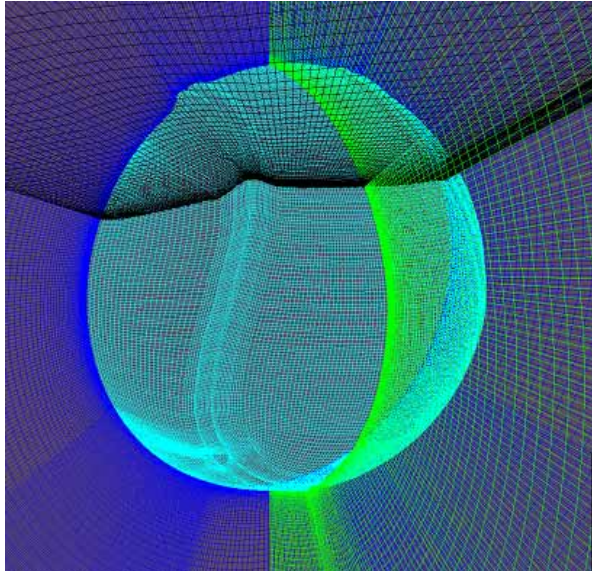
- スイング動作は身体各部位の回転軸方向が3次元的に異なる多重回転運動を基本
- Lagrange運動方程式におけるコリオリ力・遠心力の項が作用しリリース現象に大きく関与
- 特にコリオリ力を強調
  - 遠心力や角加速度による回転力は一般的に馴染みがあり, ことさら強調する必要はない
  - 遠心力や角加速度による回転力を中心して考察すると, 平面運動としての解釈に陥りがち
  - 新運動原理は, 遠心力や角加速度による回転力は無視して良いと主張している訳ではない
  - コリオリ力を意識することが, スイング動作を3次元運動として正しく議論するためには必要

N. Bernstein (1967)

**文脈の問題:** 筋肉指令が同じでも、現れる運動は前後の運動で干渉を受け変化(文脈を捉えることが重要)

**自由度の問題:** 筋肉間の干渉構造(協応構造)を作り上げることで制御する自由度を抑制  
(協応構造の獲得が学習や習熟)

## 新魔球： ジャイロボール



**ジャイロボール**: ボールの飛翔方向とボールの回転軸が一致  
飛翔方向正面に向くボールの縫い目のパターンで抵抗係数が2倍も変化

**最適化計算結果の投球:**

リリース時の手の動きとボールとの擦れ方向からすると  
ジャイロボールを投げている可能性が高い

# 技能の伝承 / 仮想トレーニング

CGアニメーション可視化



理化研: 4Dルーム



## まとめと展望

- スポーツにおける(最適化)生体力学シミュレーションに関して、意義と具体的な投球動作の実験結果を報告
- 解析結果から導かれた“新運動原理:コリオリカがリリース現象の原動力”
- 新魔球ジャイロボール
- 技能の伝承(CG可視化、仮想バッティング・トレーニング)

ヒューマノイドロボット:人間のように行動し,人間との共生が最終目標

人間:日常生活の中で我々人間が行う動作は,スポーツ動作までが可能な運動能力のマージンの中で営まれている

人間と共生するヒューマノイドロボット

スポーツ動作が可能なくらいの運動能力のマージンが必要?

いきなりスポーツ動作をターゲットにしたヒューマノイドロボットを研究することが,意外にも人間との共生目標を達成するための近道?