

投球における上肢の質量と形状の変化に関する影響解析

望月 義幸

松下電器産業（株）マルチメディア開発センター

大阪府門真市大字門真 1006

e-mail: mochik@il.mei.co.jp

要旨 本報告書は、野球の投球動作において、筋力トレーニングなどで投手の上肢の質量や形状が変化したときに、投球動作に与える影響を、最適化を応用したシミュレーション実験によって解析し、筋力トレーニングと投球動作の改善に関して何らかの知見を得ることを目的とした行ったものである。実験結果と考察から、(1)筋力トレーニングによる上肢の変化は、動作の改善のためのきっかけとしての意味も持つ可能性が高い、(2)筋力トレーニングによって上肢の変化が起こる場合には、同時に動作の改善は必須であるという2つの知見を得た。

1. 始めに

現状の投球動作でもかなり優れた成績を残しているにも関わらず、更に、筋力トレーニングを積むことによって筋力を増強させ、これによって投球速度の増加を図ろうとすることが、まま見受けられる。トレーニングによって、確かに筋力は増大するであろうが、その分上肢も、形状や質量の両面で増加や変形を受ける。このような上肢の変化に対して、同じ投球動作で目的を達成しようとするならば、ボール速度を増加させる為のトルクの上昇の他、上肢自身を振る為のトルクも増加するはずである。このような状況下で、筋力アップに見合うボール速度の上昇が、果たして、投球動作自体の改善なしに得られるのであろうか。本報告書では、このような筋力トレーニングと投球動作の改善に関する疑問に対して、解答の一端を、我々がこれまでに行ってきた投球動作の最適化[1][2][3]を応用したシミュレーション実験によって示すことを目標として行ったものである。

以下では、第2章でシミュレーションに用いた数理モデルについて述べ、第3章で最適化処理の流れについて説明する、第4章で前述の目標に対するシミュレーション実験方法を述べ、第5章でその実験結果を報告する。第6章で結果に対する考察を加え、第7章でまとめを行う。

2. 数理モデル

上肢運動において、肩関節以降の部位の運動は、肩関節の軌道のみの影響を受ける。従って、肩関節より体幹側の運動は、肩関節の軌道表現でブラック・ボックス

化できる．上肢は，一般に，肩関節における水平位内転・外転，外転・内転，内旋・外旋と，肘関節における屈曲・伸展，前腕関節における回内・回外，手関節における橈屈・尺屈および背屈・掌屈の7自由度を持つ．これらの点を踏まえて，上肢のモデル化を試みた．

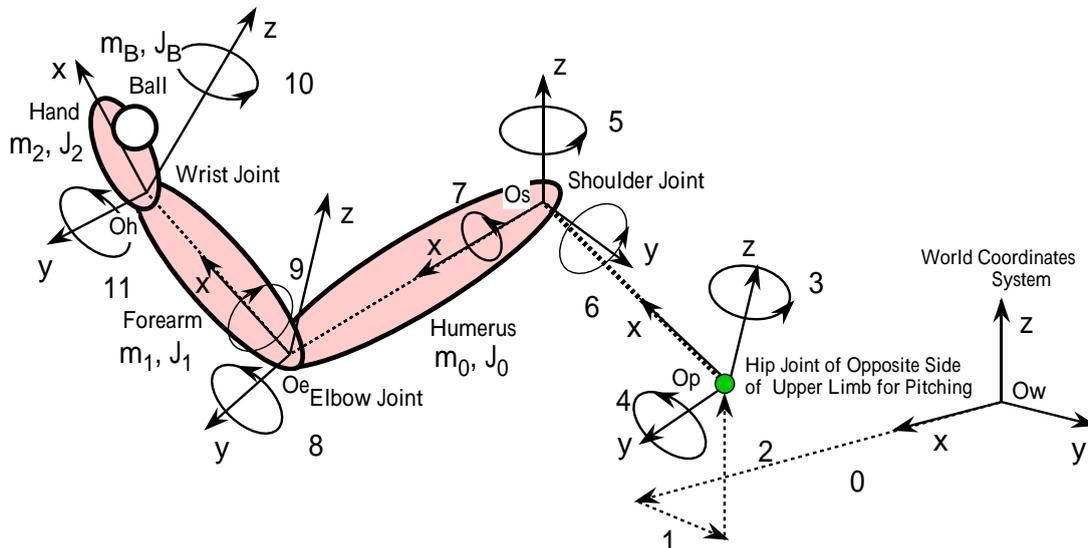


図1 上肢の数理モデル

図1はボールをリリースする前の数理モデルに変数を付加したものである．まず，肩関節の軌道の制御は，ボールを投げる側の上肢の肩関節とその反対側の股関節の3自由度の並進運動とこの股関節を中心とする2自由度の回転運動によって行うことにした．これは，3次元計測データを分析したところ，投球中，投げる側の上肢の肩関節とその反対側の股関節の距離は大きな変化を起こさないということに基づいている．これらの5自由度に対して，0，1，2によって，肩関節位置の軌道制御におけるワールド座標系 ($O_w\text{-}xyz$) でのx軸，y軸，z軸方向への並進運動の変数を割り振り，3，4によってz軸，y軸周りの回転運動についての変数を割り付けた．肩関節の3自由度については，5が水平位内転・外転の変数，6は外転・内転の変数，7は内旋・外旋の変数である．肘関節については，8が屈曲・伸展の変数で，前腕関節の回内・回外については近似的に肘関節の位置に9を割り付けた．手関節については，10が橈屈・尺屈の変数で，11は背屈・掌屈の変数である．各局所座標系は，DenavitとHartenbergによるD-H記法 [4]に基づいて，セグメントの軸方向と各局所座標系のx軸とが一致するように定義している．上肢の形状については，上腕や前腕，手を，断面が楕円で側面が3次spline的に変化する剛体で近似したもので構成し，ボールは球状の剛体としている．慣性テンソルは，数値積分によって計算している．なお，ボールはリリース前は投げる側の手に固定された状態で，リリース後は上肢から分離した状態でモデル化している．

i 局所座標系が変数 q_i を定義するとしたとき， i 局所座標系で座標表現された位置を， $i-1$ 局所座標系での表現に変換する 4×4 行列を A_i とする．但し， $i=0$ のときはワールド座標系での表現に変換する．また， A_B はボールに関する B 局所座標系を 11 局所座標系での表現に変換する定数行列とする．このとき $T_i = A_0 A_1 \cdots A_i$ は i 局所座標系で座標表現された位置をワールド座標系での表現に変換する．上腕の質量を m_0 ，慣性テンソルを J_0 ， 7 局所座標系での重心の位置ベクトルを r_0 ，前腕の質量を m_1 ，慣性テンソルを J_1 ， 9 局所座標系での重心の位置ベクトルを r_1 ，手の質量を m_2 ，慣性テンソルを J_2 ， 11 局所座標系での重心の位置ベクトルを r_2 ，ボールの質量を m_B ，慣性テンソルを J_B ， B 局所座標系での重心の位置ベクトルを r_B とし，重力加速度ベクトルを $g = (0, 0, -g, 0)$ とする．このとき，例えば，リリース前のLagrange運動方程式は以下の式(1)，(2)，(3)で表現できる．

$$\begin{aligned}
i = & \sum_{k=0}^7 \text{trac} \left[\frac{T_7}{e} J_0 \frac{T_7^T}{i} \right]_k + \sum_{k=0}^9 \text{trac} \left[\frac{T_9}{e} J_1 \frac{T_9^T}{i} \right]_k + \sum_{k=0}^{11} \left[\text{trac} \left[\frac{T_{11}}{e} J_2 \frac{T_{11}^T}{i} \right] + \text{trac} \left[\frac{T_B}{e} J_B \frac{T_B^T}{i} \right] \right]_k \\
& + \sum_{k=0}^7 \sum_{l=0}^7 \text{trac} \left[\frac{2T_7}{e} J_0 \frac{T_7^T}{i} \right]_{k,l} + \sum_{k=0}^9 \sum_{l=0}^9 \text{trac} \left[\frac{2T_9}{e} J_1 \frac{T_9^T}{i} \right]_{k,l} + \sum_{k=0}^{11} \sum_{l=0}^{11} \left[\text{trac} \left[\frac{2T_{11}}{e} J_2 \frac{T_{11}^T}{i} \right] + \text{trac} \left[\frac{2T_B}{e} J_B \frac{T_B^T}{i} \right] \right]_{k,l} \\
& - m_0 g^T \frac{T_7}{i} r_0 - m_1 g^T \frac{T_9}{i} r_1 - m_2 g^T \frac{T_{11}}{i} r_2 - m_B g^T \frac{T_B}{i} r_B \quad \text{where } i=0, 1, \dots, 7.
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
i = & \sum_{k=0}^9 \text{trac} \left[\frac{T_9}{e} J_1 \frac{T_9^T}{i} \right]_k + \sum_{k=0}^{11} \left[\text{trac} \left[\frac{T_{11}}{e} J_2 \frac{T_{11}^T}{i} \right] + \text{trac} \left[\frac{T_B}{e} J_B \frac{T_B^T}{i} \right] \right]_k \\
& + \sum_{k=0}^9 \sum_{l=0}^9 \text{trac} \left[\frac{2T_9}{e} J_1 \frac{T_9^T}{i} \right]_{k,l} + \sum_{k=0}^{11} \sum_{l=0}^{11} \left[\text{trac} \left[\frac{2T_{11}}{e} J_2 \frac{T_{11}^T}{i} \right] + \text{trac} \left[\frac{2T_B}{e} J_B \frac{T_B^T}{i} \right] \right]_{k,l} \\
& - m_1 g^T \frac{T_9}{i} r_1 - m_2 g^T \frac{T_{11}}{i} r_2 - m_B g^T \frac{T_B}{i} r_B \quad \text{where } i=8, 9.
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
i = & \sum_{k=0}^{11} \left[\text{trac} \left[\frac{T_{11}}{e} J_2 \frac{T_{11}^T}{i} \right] + \text{trac} \left[\frac{T_B}{e} J_B \frac{T_B^T}{i} \right] \right]_k + \sum_{k=0}^{11} \sum_{l=0}^{11} \left[\text{trac} \left[\frac{2T_{11}}{e} J_2 \frac{T_{11}^T}{i} \right] + \text{trac} \left[\frac{2T_B}{e} J_B \frac{T_B^T}{i} \right] \right]_{k,l} \\
& - m_2 g^T \frac{T_{11}}{i} r_2 - m_B g^T \frac{T_B}{i} r_B \quad \text{where } i=10, 11.
\end{aligned} \tag{3}$$

但し， $i=0, 1, 2$ のときは， q_i は並進力を表わし， $i=3, \dots, 11$ のときはトルクを表わす．ボールのリリース後についても同様のLagrange運動方程式によって表すことができる．これらのLagrange運動方程式は，ボールのリリース前後で，運動方程式系を切り替えて使用する．

トルクの働く方向については， q_5 はマイナスのときが水平位外転方向，プラスのときが水平位内転方向のトルクで， q_6 はプラスのときが内転方向，マイナスが外転

方向のトルクで， τ_7 はプラスのときが外旋方向，マイナスが内旋方向のトルクである． τ_8 はプラスのときが伸展方向，マイナスが屈曲方向のトルクで， τ_9 はプラスのときが回外方向，マイナスが回内方向のトルクを表わす． τ_{10} はマイナスのときが構屈方向，プラスが尺屈方向のトルクで， τ_{11} はプラスのときが背屈方向，マイナスが掌屈方向のトルクである．

ボールのリリースポイントは，ボールを持った状態で投球動作を行ったときに，ボールの速度が垂直下方向に成分を有し，かつボールの水平速度が最大となる位置として決定している．また，リリース後のボールについては，抗力のみを考慮した Newton 運動方程式に従うものとした．

3. シミュレーション処理の流れ

図 2 は最適化動作生成シミュレーションの全体処理の流れの概要を示したものである．本手法の特徴の一つは，最適化を行う初期動作を 3次元動作計測で得た，実際の投球動作としている点である．これは，現実の動作に対して改良を加えて最適な動作を得るという点で意味があり，また，初期動作が実際の人間の行っているものであれば，人間が実行不能な動作への収束が起こり難いだろうとの考えに基づいている．初期動作の計測は，スポーツ・バイオメカニクス分野では一般的な，DLT (Direct Linear Transformation) 法[5]によって実行している．このようにして得られた，関節や手先などの末端部に設定した上肢の特徴点の 3次元位置の時系列データを関節角の時系列データに変換する．これら関節角の時系列データ，慣性テンソルや上肢セグメントの重心位置，長さ，質量などの物理パラメータを入力として，最適化計算を実行する．最適化計算は，BFGS 公式による準 Newton 法によって実行している．最適化計算の結果得られた動作は，独自開発した動作のブラウジングソフト[6][7]を用いて可視化する．但し，上肢運動のみを可視化しても，全身の運動との関連性が分からないので，3次元計測した上肢以外の部位のデータとシミュレーション結果の上肢運動と時刻を合わせて合成して可視化している．また，シミュレーション結果は必要に応じてグラフ表示を行う．

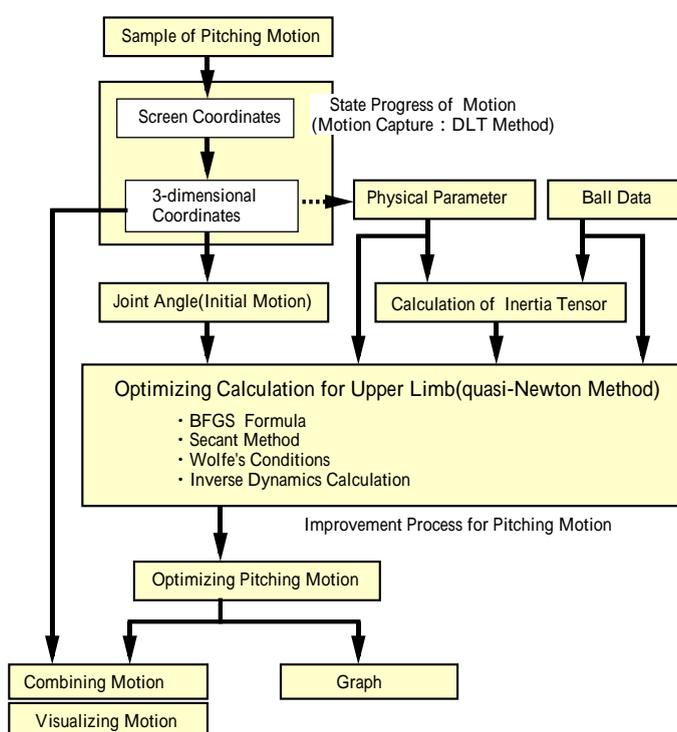


図 2 処理の流れ

4 . 実験方法

最適化を行うための目的関数については以下の式(4)を用いた .

$$E(t) = W_0 (v_5^2 + v_6^2 + \dots + v_{11}^2) dt + W_1 [(d_5/dt)^2 + (d_6/dt)^2 + \dots + (d_{11}/dt)^2] dt \\ + W_2 [(d^2_5/dt^2)^2 + (d^2_6/dt^2)^2 + \dots + (d^2_{11}/dt^2)^2] dt \\ + W_3 (\text{Penalty for Joint Movability}) + W_4 (\text{Penalty for Joint Torque}) + W_5 (\text{Penalty for Ball Velocity}) \quad (4)$$

但し, 式(4)の W_0 から W_5 は重み係数は重み係数である . また, リリースポイントの決定方法は, 投球速度及び投球角度を同時に区間として評価する以下の式(5)を用いた .

$$E_r(t) = 0.1 v_b(t-2\Delta t)(1 - |\tan(\alpha(t-2\Delta t) - \alpha_{\text{given}})|) + 0.2 v_b(t-\Delta t)(1 - |\tan(\alpha(t-\Delta t) - \alpha_{\text{given}})|) \\ + 0.4 v_b(t)(1 - |\tan(\alpha(t) - \alpha_{\text{given}})|) + 0.2 v_b(t+\Delta t)(1 - |\tan(\alpha(t+\Delta t) - \alpha_{\text{given}})|) \\ + 0.1 v_b(t+2\Delta t)(1 - |\tan(\alpha(t+2\Delta t) - \alpha_{\text{given}})|) \quad (5)$$

但し, $v_b(t)$ は時刻 t におけるボール速度で, Δt は評価を行う時間ステップ幅, $\alpha(t)$ はボールの速度ベクトルと水平方向とのなす角, α_{given} は与えられた投球角度である . 評価方法としては, 最初, ボールを持った状態で, ボールリリースが起こるであろうと指定された時間区間の微小時間区間 $[t-2\Delta t, t+2\Delta t]$ 毎に式(5)の $E_r(t)$ を算出する . それらのうち, $E_r(t)$ が最大となる時刻 t でリリースが起こるとした . なお, α_{given} は -2.5 度から 0.0 度の間とした .

初期動作については, プロ野球投手のオーバーハンドスタイルによる投球動作を用いた . なお, 投球動作は, テイクバックからフォロースルーまでの 0.860061 秒間で構成されており, 計算ステップ幅は, 0.00286687 秒とした (300 ステップでの計算). 関節の可動範囲は文献[8]を参考に定め, トルクの罰則の閾値は手関節については 10Nm , 肘関節については 50Nm とした . 変形前の上肢 (前腕, 上腕) の質量, 慣性テンソルについては, 表 1 に示した Original の上肢の物理データを使用した . 但し, この上肢のデータは動作計測時に本人のデータを測定できなかったため, 他の人間の上肢を計測した結果を用いている .

実験方法としては, まずボール速度条件 40 m/s (144 km/h) で, 計測動作を初期動作とする最適化 (Original データを使用) を行った投球動作を生成する . これは, 最適な投球動作を修得したことを想定したものである . 次に, 筋力トレーニングによる上肢の変形を想定して, 上肢のうち上腕と前腕のサンプリング楕円断面の半径が, 5% 増加した場合 (Plus 5%), 10% 増加した場合 (Plus 10%), 15% 増加した場合 (Plus 15%), 20% 増加した場合 (Plus 20%), 25% 増加した場合 (Plus 25%), 30% 増加した場合 (Plus 30%) の上肢を設定した . これらの上肢条件に対して, 新たにボール速度条件 45 m/s (162 km/h) で再最適化を行い投球動作を生成する . また比較の為に, 上肢を元のままの変形なしで, ボール速度条件だけを 45 m/s として再最適化を

行い投球動作を生成する．なお，これらの変更を加えた上肢条件における物理データを表 1 にまとめる．

表 1 上肢の質量と慣性テンソル

		Mass (kg)	Inertia Tensor H _{xx} (m ² kg)	Inertia Tensor H _{yy} (m ² kg)	Inertia Tensor H _{zz} (m ² kg)	Inertia Tensor H _{xy} (m ² kg)	Inertia Tensor H _{yz} (m ² kg)	Inertia Tensor H _{zx} (m ² kg)
Original	Humerus	1.934663	2.2021262 × 10 ⁻³	1.21482978 × 10 ⁻²	1.24127924 × 10 ⁻²	1.81309 ⁻⁵ × 10	-6.0618 ⁻⁶ × 10	-4.24122 ⁻⁵ × 10
	Forearm	1.127990	8.025930 × 10 ⁻⁴	5.7933046 ₃ × 10 ⁻³	5.9546091 ₃ × 10 ⁻³	8.304 ⁻⁷ × 10	6.455 ⁻⁷ × 10 ⁻⁷	9.38436 ⁻⁵ × 10
Plus 5%	Humerus	2.132888	2.674589 × 10 ⁻³	1.3501306 × 10 ⁻²	1.38231096 × 10 ⁻²	1.92324 ⁻⁵ × 10	-6.6082 ⁻⁶ × 10	-4.55638 ⁻⁵ × 10 ⁻⁵
	Forearm	1.243665	9.751122 × 10 ⁻⁴	6.4235386 ₃ × 10 ⁻³	6.6203018 ₃ × 10 ⁻³	6.305 ⁻⁷ × 10	6.858 ⁻⁷ × 10	10.37842 ⁻⁵ × 10
Plus 10%	Humerus	2.341301	3.2209701 ₃ × 10 ⁻³	1.49464804 × 10 ⁻²	1.53351947 × 10 ⁻²	2.20432 ⁻⁵ × 10	-7.4531 ⁻⁶ × 10 ⁻⁶	-5.11286 ⁻⁵ × 10
	Forearm	1.365139	11.743705 ₄ × 10 ⁻⁴	7.0928387 ₃ × 10 ⁻³	7.3302318 ₃ × 10 ⁻³	11.003 ⁻⁷ × 10	7.409 ⁻⁷ × 10	11.39715 ⁻⁵ × 10
Plus 15%	Humerus	2.559146	3.8460688 ₃ × 10 ⁻³	1.64817358 × 10 ⁻²	1.69471744 × 10 ⁻²	2.35299 ⁻⁵ × 10	-8.2122 ⁻⁶ × 10 ⁻⁶	-5.40948 ⁻⁵ × 10
	Forearm	1.492353	14.02753 ₄ × 10 ⁻⁴	7.8031995 ₃ × 10 ⁻³	8.0870443 ₃ × 10 ⁻³	12.070 ⁻⁷ × 10	6.994 ⁻⁷ × 10 ⁻⁷	12.43174 ⁻⁵ × 10
Plus 20%	Humerus	2.787085	4.5597942 ₃ × 10 ⁻³	1.81138568 × 10 ⁻²	1.8666205 × 10 ⁻²	2.58349 ⁻⁵ × 10	-8.6877 ⁻⁶ × 10 ⁻⁶	-5.88261 ⁻⁵ × 10
	Forearm	1.624935	16.625843 ₄ × 10 ⁻⁴	8.5498077 ₃ × 10 ⁻³	8.886957 ₃ × 10 ⁻³	7.700 ⁻⁷ × 10	9.674 ⁻⁷ × 10	13.55747 ⁻⁵ × 10
Plus 25%	Humerus	3.023767	5.3654111 ₃ × 10 ⁻³	1.9830481 × 10 ⁻²	2.04832876 × 10 ⁻²	2.79589 ⁻⁵ × 10	-9.6059 ⁻⁶ × 10 ⁻⁶	-6.45693 ⁻⁵ × 10
	Forearm	1.763201	19.570191 ₄ × 10 ⁻⁴	9.3364429 ₃ × 10 ⁻³	9.7339669 ₃ × 10 ⁻³	12.341 ⁻⁷ × 10	9.896 ⁻⁷ × 10 ⁻⁷	14.79771 ⁻⁵ × 10
Plus 30%	Humerus	3.270475	6.2743029 ₃ × 10 ⁻³	2.16559951 × 10 ⁻²	2.24198385 × 10 ⁻²	3.04136 ⁻⁵ × 10	-10.3996 ⁻⁶ × 10 ⁻⁶	-7.13703 ⁻⁵ × 10 ⁻⁵
	Forearm	1.907456	22.893606 ₄ × 10 ⁻⁴	10.1716828 × 10 ⁻³	10.6368425 ₃ × 10 ⁻³	20.828 ⁻⁷ × 10	10.52 ⁻⁷ × 10 ⁻⁷	15.93347 ⁻⁵ × 10 ⁻⁵

5. 実験結果

図3は、ボール速度条件 40 m/s (144 km/h) で、計測動作を初期動作とする最適化を行った結果の投球動作を手の軌跡付きで表したものである。比較の為にに行った、上肢は元のままで、ボール速度条件を 45m/s とした再最適化については、投球動作の改善は全く行われず終了した。図4は、各上肢条件における再最適化の結果の投球動作を手の軌跡付きで示したものである。表2は、ボール速度条件 40 m/s のときの最適化と、各上肢条件におけるボール速度条件を 45m/s のときの再最適化の結果の投球動作の身体各部位の最大速度、およびボールのリリース時の速度を時刻付きでまとめたものである。グラフ1からグラフ4は、ボール速度条件 40 m/s のときの最適化結果と、Plus 10%、Plus 20%、Plus 30%のときの再最適化結果の投球動作における、関節角の時間変化を示したものである。グラフ5からグラフ8は、ボール速度条件 40 m/s のときの最適化結果と、Plus 10%、Plus 20%、Plus 30%のときの再最適化結果の投球動作における、身体各部位の速度の時間変化を、グラフ9からグラフ12は、同様の投球動作における、関節トルクの時間変化を示したものである。グラフ13は同様の投球動作における、手先の加速度の時間変化、グラフ14は躍度の時間変化を表したものである。グラフ15は、ボール速度条件 40 m/s のときの最適化結果の投球動作に対して、各上肢条件を当てはめたときの、トルクの2乗総和、1次、2次微係数の2乗総和、 θ_5 から θ_8 の2乗総和を示したものである。グラフ16は、ボール速度条件 45 m/s で再最適化を行ったときの投球動作における、各上肢条件を当てはめたときの、トルクの2乗総和、1次、2次微係数の2乗総和、 θ_5 から θ_8 の2乗総和を示したものである。グラフ17は、ボール速度条件 40 m/s のときの最適化結果の投球動作に対して各上肢条件を当てはめたとき、およびボール速度条件 45 m/s で再最適化を行ったときの投球動作と、元の上肢条件でボール速度条件 40 m/s のときの最適化結果の投球動作との、トルクの2乗総和、1次、2次微係数の2乗総和の比を記したものである。

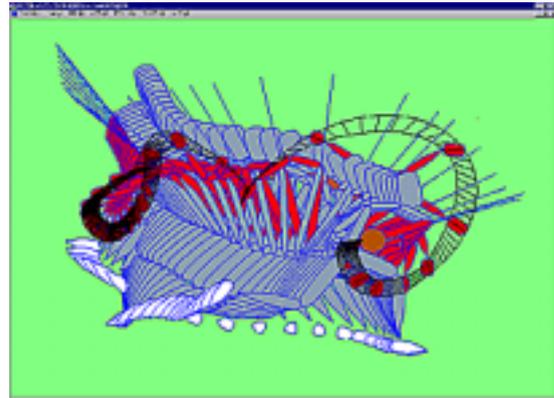


図3 速度条件 40 m/s の最適化結果の投球動作

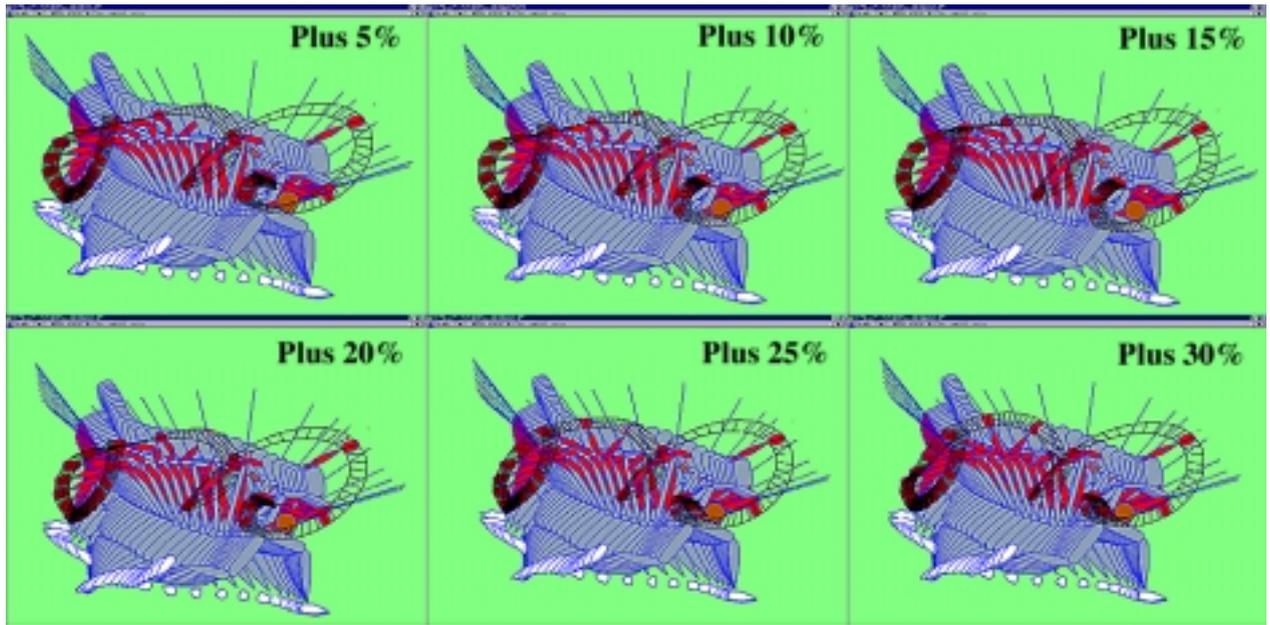
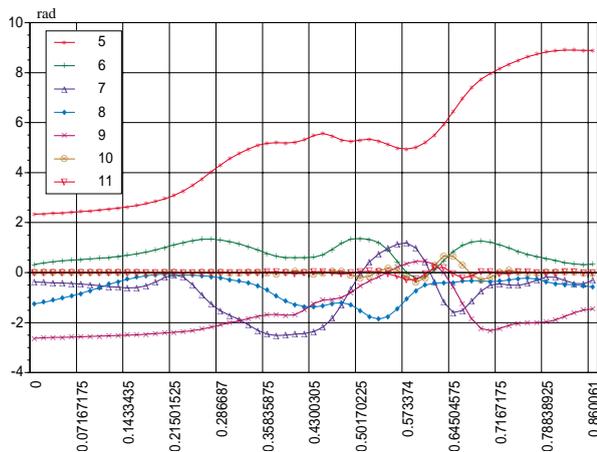


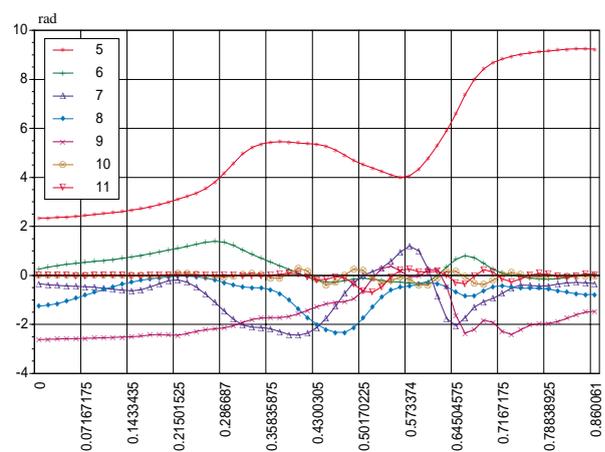
図4 ボール速度条件 45 m/s の再最適化結果の投球動作

表2 身体各部位の最大速度とボールのリリース速度

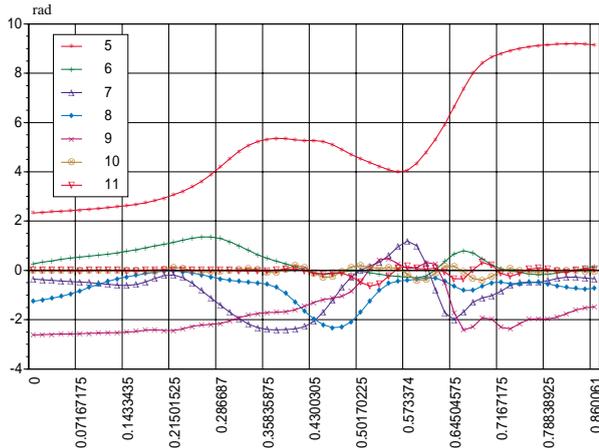
	Original	Plus 5%	Plus 10%	Plus 15%	Plus 20%	Plus 25%	Plus 30%
Elbow (m/s)	14.88 (0.599)	15.47 (0.602)	15.39 (0.599)	15.22 (0.599)	15.44 (0.599)	14.88 (0.599)	14.60 (0.599)
Wrist (m/s)	29.62 (0.619)	34.37 (0.619)	34.08 (0.619)	34.00 (0.619)	33.73 (0.619)	33.88 (0.619)	33.58 (0.622)
Hand (m/s)	42.78 (0.619)	46.34 (0.622)	45.83 (0.619)	45.63 (0.622)	46.00 (0.622)	46.19 (0.622)	45.25 (0.622)
Ball (m/s)	39.64 (0.616)	44.98 (0.619)	44.98 (0.619)	44.66 (0.619)	45.00 (0.619)	44.86 (0.619)	44.53 (0.622)



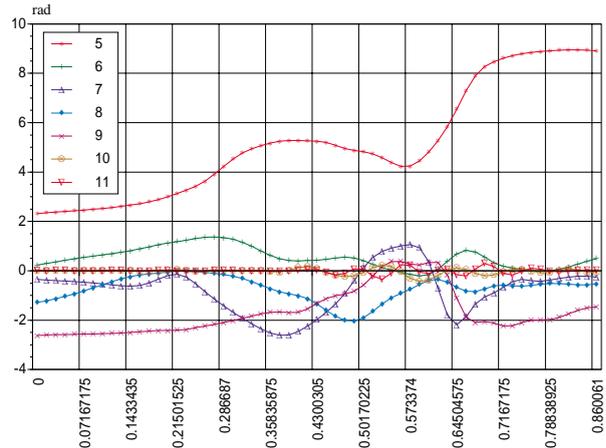
グラフ1 Original 条件での関節角



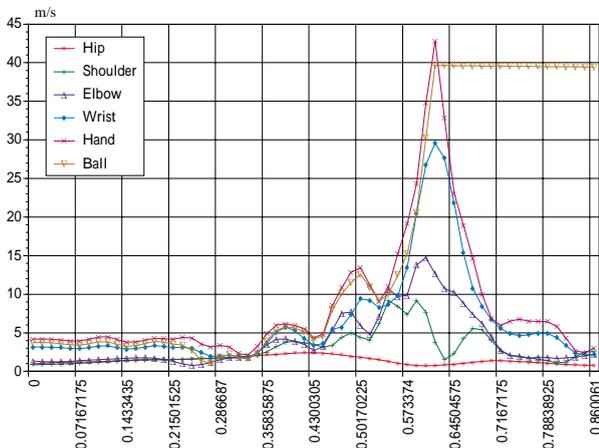
グラフ2 Plus 10%条件での関節角



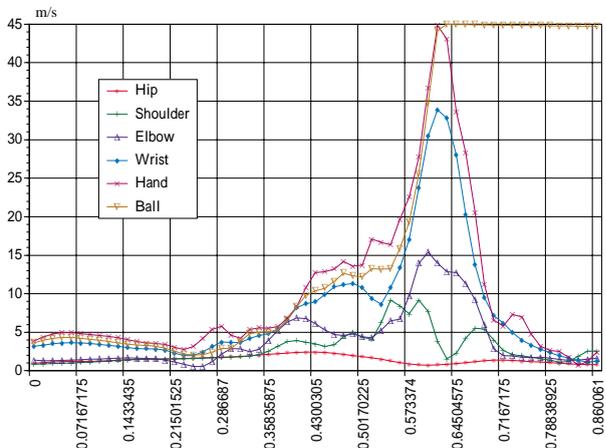
グラフ 3 Plus 20%条件での関節角



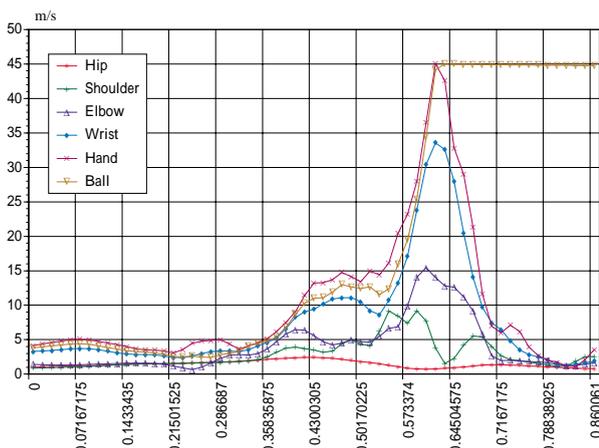
グラフ 4 Plus 30%条件での関節角



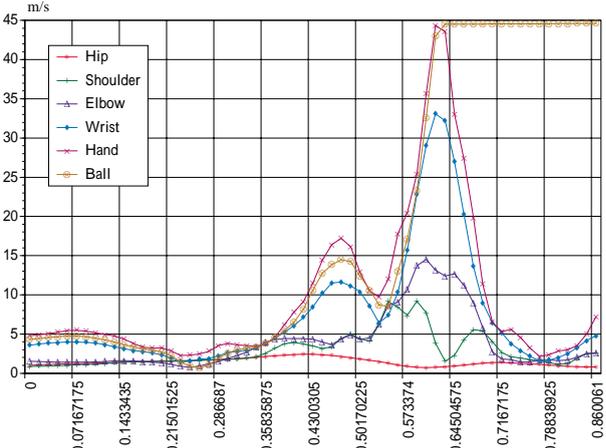
グラフ 5 original 条件での速度



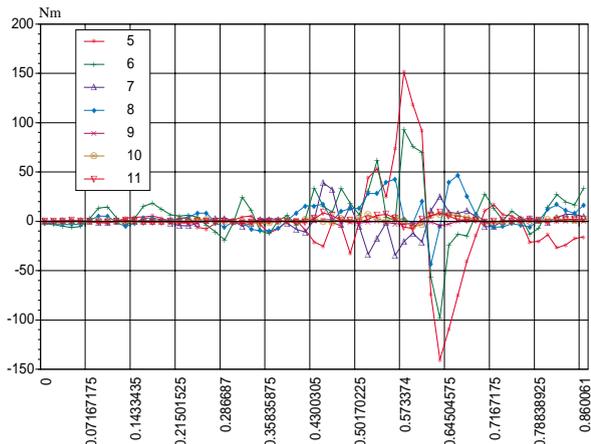
グラフ 6 Plus 10%条件での速度



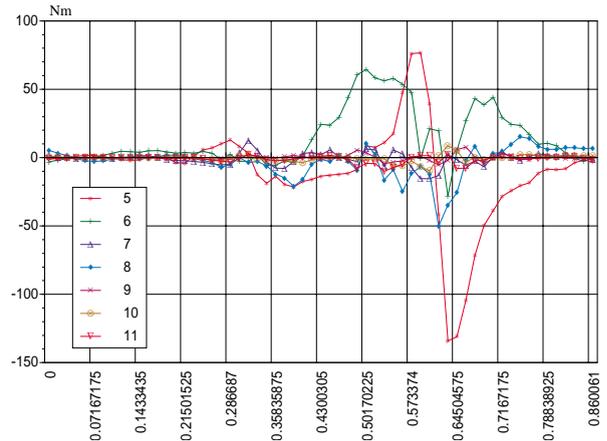
グラフ 7 Plus 20%条件での速度



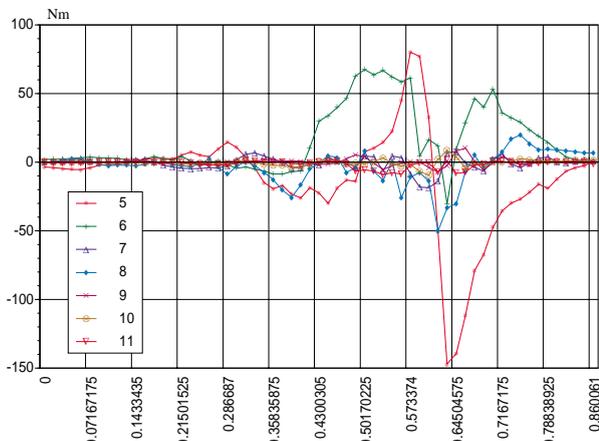
グラフ 8 Plus 30%条件での速度



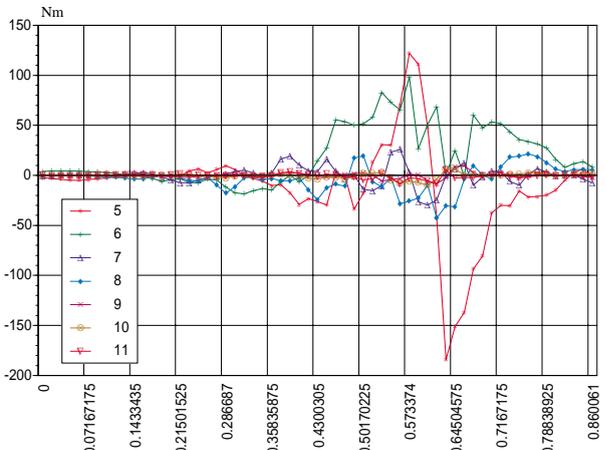
グラフ 9 original 条件での関節トルク



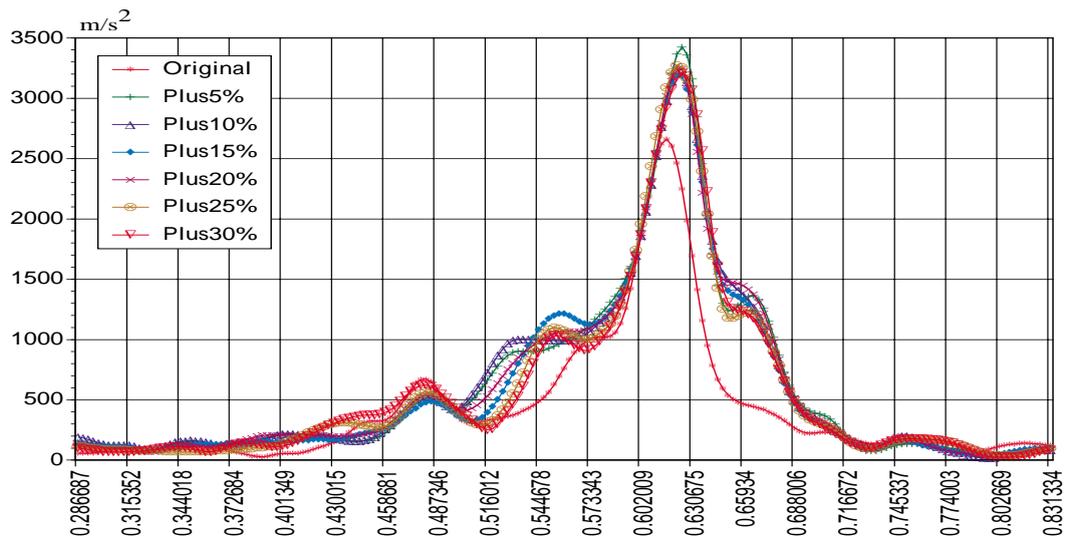
グラフ 10 Plus 10%条件での関節トルク



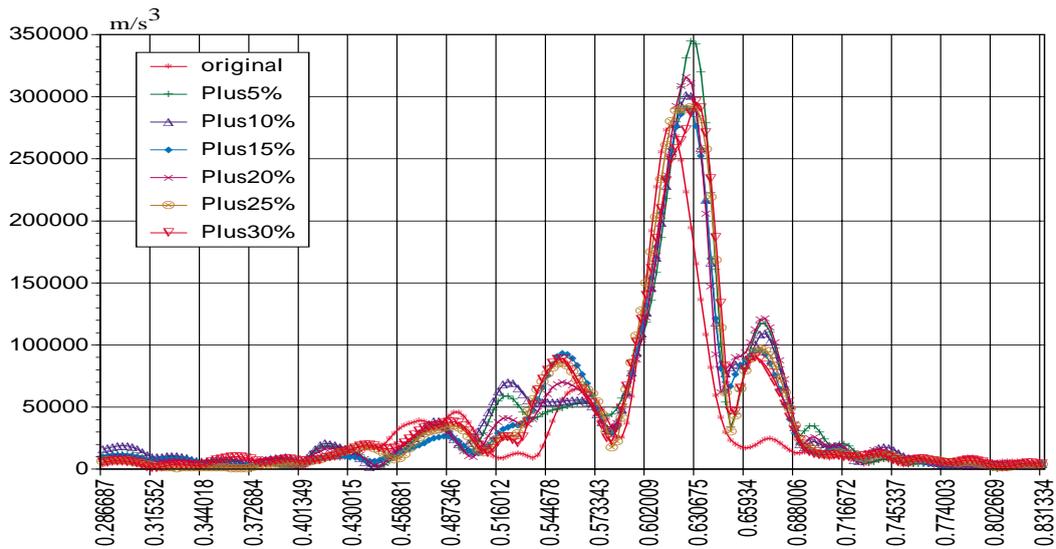
グラフ 11 Plus 20%条件での関節トルク



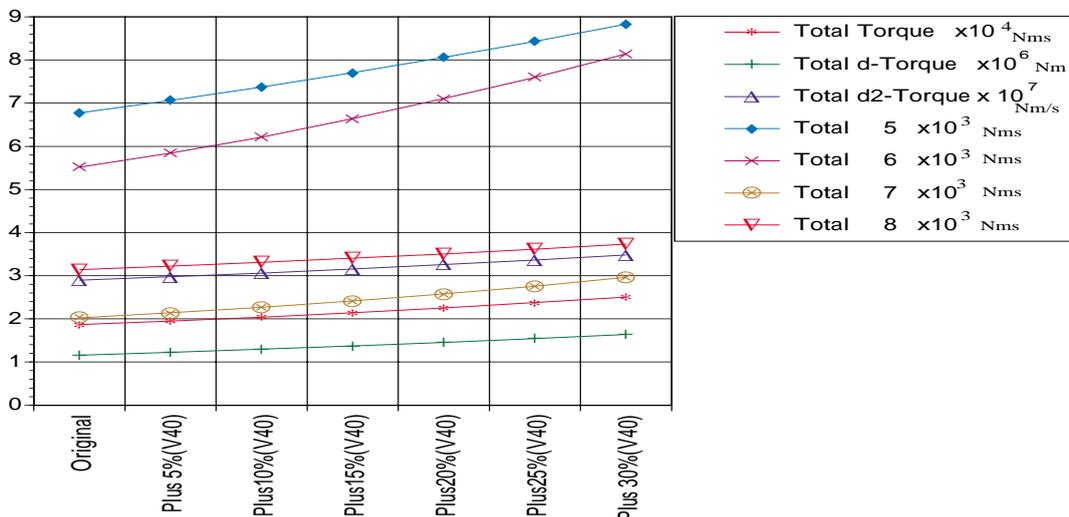
グラフ 12 Plus 30%条件での関節トルク



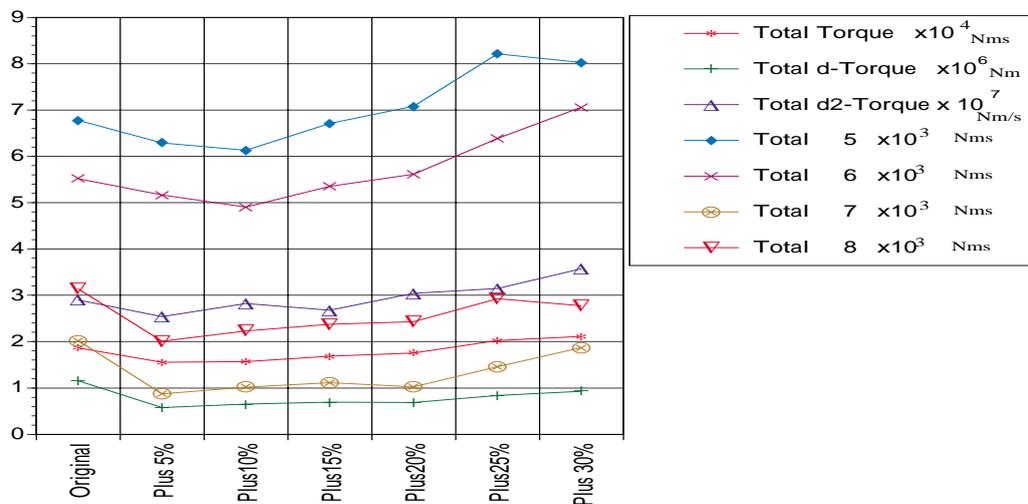
グラフ 13 各条件における手先の加速度



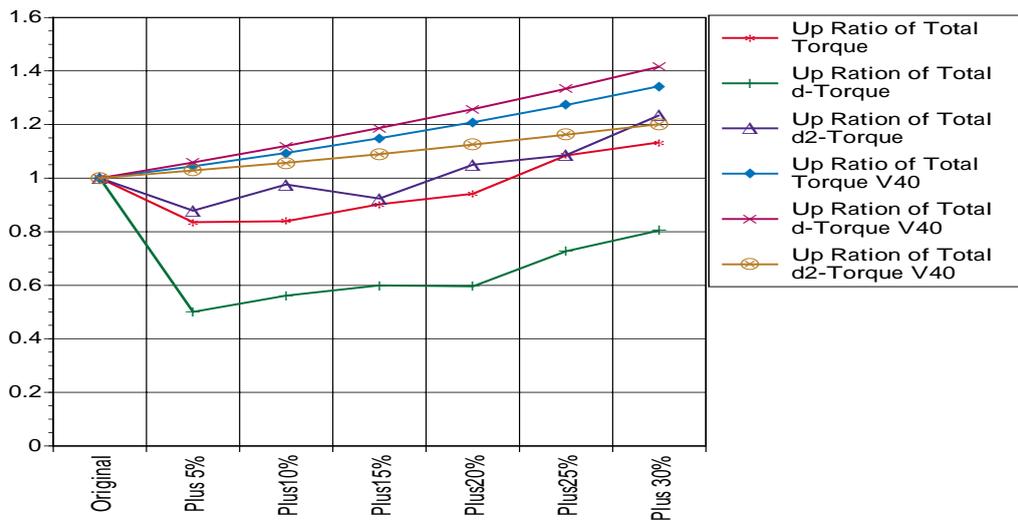
グラフ 14 各条件における手先の躍度



グラフ 15 速度条件 40 m/s の最適化投球動作に対する各上肢条件のトルクに関する総量



グラフ 16 速度条件 45 m/s の再最適化投球動作に対する各上肢条件のトルクに関する総量



グラフ 17 各上肢条件のトルクに関する総量の Original に対する比

6 . 考察

まず，比較の為に行った，上肢は元のままでボール速度条件を 45m/s とした再最適化では，投球動作の改善が全く行われなかったことについては，何らかの物理的な要因の変更がない限り，これ以上，増加したボール速度条件を満たすような投球動作の改善はないということと解釈できる．一方，上肢条件を変えたときには投球動作の改善が行われたということは，その物理的要因の変更の一つとして上肢条件を変えることが役立ったと考えられる．つまり，一般には，単に発生する筋力を増すことを目的として，筋力トレーニングは行われるが，実は，トレーニングによる上肢の質量や形状という，筋力とは無関係な物理的変化が，更に投球動作を改善するためのきっかけに成り得るということを示唆している．

次に再最適化の結果について観てみると，表 2 からは，各上肢条件において，ボール速度条件の 45 m/s はほぼ満たされていることが分かる．図 3 と図 4 から，45m/s での再最適化の投球動作と元の 40m/s での最適化の投球動作とを，手先の軌跡に着目して比較すると，ループ部に行く手前の部分（レイトコッキングに入るまでのところ）の前のところと，ループ部がかなり変更されていることが分かる．再最適化の投球動作同士を比較すると，図 4 からループ部に行く手前の部分の形から，2つのグループ（Plus5%から 20%のグループと Plus 25% , 30%のグループ）に投球動作が分類できることが分かる．これらの分類による動作の違いについては，グラフ 6 からグラフ 8，およびグラフ 9, 10 における，0.43 秒から 0.57 秒間での違いとして観察でき，特に，グラフ 9 での 0.48 秒から 0.54 秒付近で観察することができる．また，上肢の変形が大きくなるにつれて，ループ部の大きさが小さくなっていくことが観察される．

グラフ 1 からグラフ 4 では，特に 5 と 6, 7 が大きく変更されていることが分かる．つまり，上肢の変化によって最も負荷の変化が大きい，肩関節部での変更が重点的に行われたと解釈できる．更に，グラフ 9 からグラフ 12 から，この変更はト

ルクの改善が目的であることが分かる。元の 40m/s での最適化の投球動作と、45m/s での再最適化の投球動作の同グラフを比較すると、特に、肩関節では極値の値が小さくなり、平坦化されていることが分かる。上肢条件が変わっても何の改善も行わずに、元の投球動作で 40 m/s で投球する場合でも、グラフ 15, 17 に示した増加があるにも関わらず、グラフ 16, 17 では Plus 20%までは、投球動作の改善によって、ボール速度が増加し、上肢質量が増しているにも関わらず、元の投球動作に比べて減少していることが分かる。

7. まとめ

本報告書では、野球の投球動作において、投手の上肢が筋力トレーニングなどで質量や形状が変化を起こしたときに、投球動作に与える影響について最適化を応用したシミュレーションによる実験方法とその結果、考察について述べた。本シミュレーション実験結果に対する考察をまとめると、筋力トレーニングと投球動作の改善に関して、本実験で用いた被験者の投球動作については、少なくとも次の二つの知見が得られる。

- (1) 筋力トレーニングによる上肢の変化は、動作の改善のためのきっかけとしての意味も持つ可能性が高い。
- (2) 筋力トレーニングによって上肢の変化が起こる場合には、同時に動作の改善は必須である。

但し、上記の結論は、身体条件や動作の種類にも依存するので、一般的な結論とするには飛躍が大きいと思われ、更に多くの解析が必要である。

参考文献

- [1]望月義幸, 天野晴雄, 手塚一志, 松元剛, 山下伸一, 大村皓一, "逆ダイナミクスと準 Newton 法による上肢の最適化投球動作シミュレーション", 身体運動のバイオメカニクス, 第 13 回日本バイオメカニクス学会大会編集委員会, pp.305-311, March 1997.
- [2]Yoshiyuki Mochizuki, Haruo Amano, Kazushi Tezuka, Tsuyoshi Matsumoto, Sshinichi Yamashita, and Koichi Omura, "Computer Simulation for Upper Limb during High Speed Baseball Pitching", Theoretical and Applied Mechanics, Vol.46, pp.271-277, 1997.
- [3]Yoshiyuki Mochizuki, Seiji Inokuchi, and Koichi Omura, "Generating Artificial Proficient Skill Motion for Upper Limb in Baseball Pitch from Several Objective Functions", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol.30, No.3, pp373-382, 2000.
- [4] Denavit, J. and Hartenberg, R.: "A kinematic notation for lower-pair mechanism based on matrices", ASME Journal of Applied Mechanics, 22, pp215-221, 1955.
- [5] Shapiro, R.: "The direct linear transformation method for three-dimensional

cinematography”, Res. Quart., 49, pp197-205, 1978.

[6] 望月義幸, 天野晴雄, 松井緑朗, 大村皓一, “人工技能システム”, 平成6年電気関係学会関西支部連合大会, S50 S8-5, 1994.

[7] (財)イメージ情報科学研究所, “スポーツ技能伝承システムの開発に関する調査研究報告書”, システム技術開発調査研究 7-R-6, (財)機械システム振興協会, 1996.

[8] 日本整形外科学会身体障害委員会・日本リハビリテーション医学会評価基準委員会編, “関節可動域表示ならびに測定法”, 図説筋の機能解剖付録(1986) 医学書院, pp225-230, 1974.