

Three-dimensional hand movements during the execution of ball juggling: Effect of expertise in street performers

Andrea Mapelli, Domenico Galante, Simone Paganoni, Laura Fusini, Gianluca Forlani, Chiarella Sforza

Journal of Electromyography and Kinesiology 22 (2012) 859–865

Abstract

- スキルが体系化された課題のパフォーマンスや動作のばらつきにおける専門的な違いを見つめるために（7ボールカスケードまでできる）advancedと（5ボールカスケードまでできる）intermediate, 異なるレベルのジャグラーの手の動きを3次元で量的に評価した。
- ボール数が増えるとレベルが高い人は、レベルが低い人よりも安定した手の動作になる。advanced ジャグラーは intermediate ジャグラーよりも低い周期で投げている。

1. Introduction

- ジャグリングは人間の知覚運動組織の変化に関する研究にとって参考になる現実的課題である (Beek and Lewbel, 1995; Huyset al., 2003, 2004a,b; Hashizume and Matsuo, 2004; Voelcker-Rehage and Willimczik, 2006).
- ジャグリングはボールの軌道を維持するために、リズムミカルに同期された上肢の周期的な動作の協調で構成される。
- 自由度が多様な課題の成功は、感覚情報や運動のアウトプットの命令、安定性と柔軟性の間にあるトレードオフで生じるエラーを克服する能力である。
 - 現在の理論では、選択された動きや一連の動作に対する自由度の程度は始めに固定され、後に様々な周期で実行可能になると考えられている (Gautier et al., 2009).
 - ◇ expert は, beginner あるいは intermediate よりも安定性や柔軟性の間で最適な選択ができる (Huys et al., 2003; Hashizume and Matsuo, 2004; Leroy et al., 2008).
- 過去15年間で、長期的な実験における経験効果やその時点における専門性の影響に関する研究が行われてきた(Huys et al., 2003; Haibach et al., 2004; Hashizume and Matsuo, 2004) (Huys and Beek, 2002; Leroy et al., 2008).
 - 3ボールでのintermediate や expert の評価 (Post et al., 2000) (Dessinget al., 2007), ボール数3つや4つでの動作パターン比較 (Beek and Turvey, 1992).
- 今回の研究は異なるレベルのジャグラーが行う、ボール数の増加を伴う標準的なジャグリング課題の手の動きを評価した。
 - 動作のばらつきにおけるスキルレベルの影響や課題の難しさの増加に伴う手の協調の変化を調査する狙いがある。

2. Methods

2.1. Participants

- 14~30歳までのストリートジャグラー（男）12名が参加した（プロフィールデータをtable1にまとめた）.
 - （7ボールカスケードができる）6人の advanced ジャグラーと（5ボールカスケードまでできる）6人の intermediate ジャグラーのグループにわけた.

2.2. Investigated movements

- ジャグリング課題は3~5ボールカスケードに限定された.
 - より自然な動作を実現するために参加者には自身のジャグリングボールを利用してもらった.
- ジャグラーには事前にウォーミングアップをしてもらい、各課題で床に落とすことなく15~20スロー行ってもらった.
 - 合間に30秒の休憩を入れて、3度繰り返してもらった.

2.3. Investigated movements

- 3次元動作解析装置が使用された.
 - 9台のTVカメラが実行スペース（幅180cm, 高さ250cm, 奥行き180cm）の角に置かれた.
- 各参加者には反射マーカーが14か所（左右のくるぶし, 膝, 尻, 上前腸骨棘^{じょうぜんちやうこつきよく}, 肩, 肘, 手首）と, 頭に3か所, 左右の手の甲と親指, 中指6か所が取り付けられた (Fig.1).

2.4. Data analysis

- 今回は中指の動きに焦点を絞って分析を行った.
- 全てのマーカー座標からローカル座標（x 軸, y 軸, z 軸）を決定した.
 - y 軸：垂直方向, x 軸：マーカーを付けたくるぶしに平行な方向, z 軸：奥行き方向
- 手の周期は, 2つの連続した頂点間でのタイミングである.
 - 始めの1周期は分析から除外された.
 - 2つの中指の周期に関する空間的, 時間的パラメータが分析された.
- ジャグリングの周期はコンピュータに記録された.
 - SD（標準偏差）は各試行の周期. ボール数毎による SDs は時間の変動係数（CV）の測定に利用された.
 - CVs は利き手ともう片方の手, 別々で測定されたが周期自体はそれと関係なしに計測された.
 - 各周期において, 中指の頂点間振幅は各3方向で測定された.
 - 3 試行を通した相対平均や SDs は（手, 方向, ボール数による）空間的な CVs の計測に利用された.
- 手の間での動きの対称性は, 非対称性の指標（AI）で座標毎に測定された.
 - $AI_x = \log_{10} (D_x/ND_x) \times 100$

- D は利き手におけるジャグラの平均頂点間振幅，ND はもう片方の手の平均頂点間振幅を示す。
- ✧ AI の正の値は利き手の動きがより大きいことを表し，負の値はもう片方の手の動きがより大きいことを表す。

3. Results

- 2つのジャグラグループ間で身体や練習の特性で有意な違いはなかった，(Mann-Whitney's U-test, $p > 0.05$; Table 1).
- ボールの大きさ，あるいは練習やパフォーマンスのばらつき間で相関はなかった ($p < 0.05$).

3.1. Frequency

- ジャグリングの周期は熟達レベル ($p = 0.01$) やボール数 ($p < 0.001$; post hoc t-test, $p < 0.001$) によって有意に影響を受け，交互作用はなかった ($p = 0.097$).
- 全てのパフォーマンスで，advanced の参加者は intermediate よりも遅かった。
 - 両グループでボール数が増加するに伴って周期が増加した (Table 2).
- 全ての課題において，advanced グループは周期の変動係数を示す平均 CVs が intermediate よりも低かったが，有意差はなかった ($p = 0.125$).
- 各手の平均 CVsについても有意差はなかった ($p = 0.922$)
- ジャグリングされたボール数に高い主効果があった ($p < 0.001$).
- t 検定で，4ボールカスケードと5ボールカスケード間で有意差があった ($p < 0.001$).
- ✧ 4ボールカスケードはより再現性であった (3ボールと有意差はなかった) .
- グループ，手，ボール数の3要因で相互作用はなかった。

3.2. Asymmetry

- ボール数は非対称性の指標に影響は与えなかった ($p = 0.922$).
- その一方で，専門性と方向には影響があった (専門性, $p = 0.025$; 方向, $p = 0.007$; Fig.2) .
- 全般的に advanced ジャグラは利き手の方がもう片方の手よりも多く動いた。
 - 逆のことが intermediate グループで生じた。
- t 検定でz 軸(奥行き)方向における AI 値は他の2方向よりも有意差があった ($p = 0.009$).
- 専門性と動作方向間で相互作用が見られた ($p = 0.005$).
- z 軸方向における advanced と intermediate グループ間で AI 値に有意差があった (t 検定: $p < 0.001$) .
- x 軸方向 (マーカーを付けたくるぶしに平行な方向) と y 軸 (垂直) 方向における AI 値に有意差はなかった。
- advanced の参加者の利き手のz 軸における平均頂点間振幅は，全体を通して intermediate 参加者よりも大きかった。
- 方向とボール数にも相互作用が見られ ($p = 0.013$)，それは y 軸における平均頂点間振幅

が3~5ボール全てにおいて同じような値であったことを示す。

- その一方で、3ボールカスケードと5ボールカスケードにおいて利き手の z 軸方向の変位量ともう片方の手の x 軸方向の変位量に有意差があった(3ボールから5ボールになると AI 値が増加した)。
- 逆に、4ボールカスケードでは各空間方向において2つの手は対称的な動きをしていた。

3.3. Spatial repeatability

- 中指の動きの再現性は、頂点間振幅に関連する空間的な CVs で評価した。
 - 手の主効果はなかったが ($p = 0.918$), 対照的にジャグリングの習熟度 ($p = 0.003$) と方向 ($p < 0.001$), ボール数 ($p < 0.001$) に主効果が見られた。
- 全体を通して、最も低い CVs は advanced グループにおける3ボールの垂直方向であった(再現性が最も高い)。
 - 逆に、最も再現性の悪い値は intermediate グループにおける5ボールの z 軸(奥行き)方向であった (Fig.3).
- いくつかの相互作用が観察された ($p < 0.001$, 専門性×ボール数; $p = 0.029$, 専門性×方向; $p = 0.033$, 専門性×手).
 - 5ボールカスケードにおいて専門性の効果が観察され (t 検定: $p = 0.003$), CV が advanced ジャグラーは intermediate グループよりも低い値であった。
 - ◇ 4ボールカスケードでも同様の傾向が見られたが、有意差はなかった。
 - ◇ 3ボールカスケードでは両グループで同じ値であった。
- advanced ジャグラーの平均 CV は、全ての方向において intermediate ジャグラーよりも値が低かった。
 - x 軸方向と y 軸方向で有意差は見られたが (t 検定: $p = 0.02$ in X, $p < 0.001$ in Y), z 軸方向では見られなかった。
 - advanced ジャグラーは、利き手の CV (平均19.31%) がもう片方の手(平均21.96%)よりも有意に低かった (t 検定: $p = 0.029$) 。
 - ◇ その一方で、intermediate グループにおいて平均的な再現性はもう片方の手の方が利き手よりも有意に低かった(利き手: 30.63%; もう片方の手: 27.75%) 。
- advanced ジャグラーは、利き手の動きの再現性が intermediate ジャグラーよりも高かった (t 検定: $p = 0.006$) 。
 - もう片方の手は両グループで似ており、有意差はなかった。

4. Discussion

4.1. Experimental protocol

- 難しさが異なる課題での動作を比較するために、先行研究ではいくつかの方略が採られた。
 - Huys and Beek (2002) では、参加者に標準的な3ボールカスケードと逆回転の3ボールカスケードの両方で好みよりも遅い、早い速度でジャグリングをするよう求めた。

- Dessing et al. (2007) は、ジャグラーにボールを外側に通す場合と内側に通す場合の4ボールカスケードを行わせた。
- Voelcker-Rehage and Willimczik (2006) は、3ボールと3枚のスカーフのカスケードを比較した。
- 今回の調査で各ジャグラーには好みの周期で標準的な3ボールカスケードを行わせた。
 - 3ボールカスケードと5ボールカスケードは、同じ動作パターンで4ボールカスケードは異なり、別の動作方略が求められた (Dessing et al., 2007).

4.2. Temporal variables

- 手の周期は、ボール数や専門性のレベルによって影響を受けた。
 - 両グループで徐々に速くなる。
 - advanced ジャグラーの方が intermediate ジャグラーの方が遅かった。
 - ◇ advanced ジャグラーは7ボールのジャグリングをする際により高く投げる必要があるため、ボール数が少なくてもその習性に移るようである (Seidler, 2004).
- advanced ジャグラーは intermediate ジャグラーよりも、好みと比べて速い、あるいは遅いスピードで故意にジャグリングすることができた。
 - 専門性要因として時間の制御がよりできることを示唆する (Huys and Beek, 2002).
- ジャグリングのような体系化されたスポーツは、コンスタントな行為が求められる。
 - 再現性が変動性よりも重要であると考えられている (Scholz and Schöner, 1999; Leroy et al., 2008; Baudry et al., 2009).
- リズミカルな動作であるジャグリングにおいて周期的な変動は常にあるが、目標としてはそれを減らすことである (Haibach et al., 2004; Hashizume and Matsuo, 2004; Muller and Sternad, 2009).
 - 時間の再現性に関する今回の知見は、部分的にこの考えを裏付けた (有意差は出なかった) .

4.3. Spatial variables

- 今回の研究では、x 軸 (横) 方向と y 軸 (垂直) 方向共に専門性の要因でばらつきが有意に減少した。
 - その一方で、z 軸 (奥行き) 方向に有意差はなかった。
 - ◇ 手の動作の奥行き方向は最も安定していない。
 - 奥行き方向の動きは主に肩の動きによるものである。
 - ◇ ボールコントロールを妨げる関節障害になる恐れもある。
 - ◇ 防止策として熟達者は動かす箇所を肩から肘にシフトする (Hashizume and Matsuo, 2004).
- 3ボール以上のジャグリングは動作のばらつきが制限される (Beek and Lewbel, 1995).
 - 反対に今回、ボール数に伴って空間的なばらつきが増加することを示した。
 - 時間的なばらつきが4ボールカスケード (最も再現性がある) と5ボールカスケード (最

も再現性がない) で有意に異なった。

◇ その一方で、4ボールカスケードと3ボールカスケードではその差が消失した。

◇ **intermediate** ジャグラーは、**advanced** ジャグラーよりも顕著であり、課題の難しさが表れていた。

✓ 似たような知見が複雑な協調課題(体操)でも示された (Gautier et al., 2009)。

- ジャグリングは、正確なボール動作の時空間パターンを構成する必要がある (Huys et al., 2003).
 - 安定性を保つためにキャッチする手はトスミスを補わなければならない。
 - ◇ 今回は、利き手ともう片方の手において時間、空間両ばらつきとも3方向で有意差はなかった。
 - ✓ 相互作用はあり、**advanced** ジャグラーは利き手がもう片方の手より有意に安定していた。
 - ✓ 先行研究では、ジャグリングの学習者は上記が報告されなかった (Haibach et al., 2004)。
- 非対称性の指標は、2つの手の動作の大きさを比較することで求めた。
 - **advanced** ジャグラーの利き手はもう片方の手よりも動作が大きかった。
 - ◇ 奥行き方向に主効果があった。
 - 対照的に、**intermediate** ジャグラーはもう片方の手を特に横方向に大きく動かした。
 - ◇ 両方の結果は3~5ボールに連れて増加した。
 - 4ボールカスケードは全体的に対称性を示した。

5. Conclusion

- 今回のジャグリングの3次元動作分析で、ボール数が増えると専門性が高い人は、低い人よりも手の動作のばらつきが少なることが明らかになった。
 - 3ボールカスケードでは **advanced** と **intermediate**、両グループで再現性が似ていた。
 - ◇ ボール数が増加すると、**intermediate** ジャグラーよりも **advanced** ジャグラーの方が、ばらつきが小さくなった。
 - ✓ さらに **advanced** ジャグラーの方が、周期が遅くなった。
- 今回の結果は、運動の安定性が高度なパフォーマンスにとってキーコンセプトであることを示す。
 - ゆっくり投げることが、ボール数が増え難くなった時に重要である。
- 今後は7ボールの方略を調査する必要がある。
 - ジャグラーが習得している最大ボール数を調査することは、正確な特定の動作のばらつきに関する閾値を求めることであり、フォームにおける専門性の効果に焦点が当てられることになるだろう。

Table 1
Characteristics of the participants.

Jugglers	Age (y)	Body mass (kg)	Height (m)	Dominant hand	Years of practice	Time/day (min)	Total practice (years × min/day)	Balls		
								Max n ^a	Diameter (mm)	Mass (g)
Advanced										
M1	18	58	1.69	Left	0.5	30	15	7	70	150
M2	22	65	1.75	Left	2	90	180	7	70	150
M3	23	62	1.80	Right	3	60	180	7	65	125
M4	30	70	1.81	Right	6	60	360	7	65	145
M5	14	60	1.65	Right	3	60	180	7	68	125
M6	21	57	1.67	Right	2	30	60	7	68	125
Median	22	61	1.72		2.5	60	180	7	68	135
1st quartile	19	59	1.68		2.0	38	90	7	66	125
3rd quartile	23	64	1.79		3.0	60	180	7	70	149
Intermediate										
M7	17	73	1.83	Right	2	20	40	5	68	125
M8	22	59	1.71	Right	2	60	120	5	70	150
M9	21	65	1.70	Right	2	30	60	5	56	80
M10	22	62	1.65	Right	4	30	120	5	62	120
M11	26	52	1.68	Right	2	30	60	5	50	80
M12	22	63	1.78	Right	2	20	60	5	68	125
Median	22	63	1.71		2.0	30	60	5	65	123
1st quartile	21	60	1.69		2.0	23	60	5	53	90
3rd quartile	22	65	1.76		2.0	30	105	5	68	125

No significant differences between the two groups (Mann-Whitney's U-test, $p > 0.05$). No statistical tests were made for the dominant hand and the maximum number of balls.



Fig. 1. Marker set (right and left: ankles 1, 2; knees 3, 4; hips 5, 6; ASIS 7, 8; shoulders 9, 10; elbows 11, 12; wrists 13, 14; head 15-17; dorsal side of the hands 18, 19; fingertips: thumb 20, 21; middle finger 22, 23). The juggler is performing a 5-ball juggling scheme.

Table 2
Mean values of time-related parameters.

No. of balls	Group	Juggling frequency (Hz)	Temporal CV (%)
3 Balls	Intermediate	1.59	5.72
	Advanced	1.37	4.90
4 Balls	Intermediate	1.89	4.68
	Advanced	1.82	4.00
5 Balls	Intermediate	2.17	8.02
	Advanced	2.01	5.45

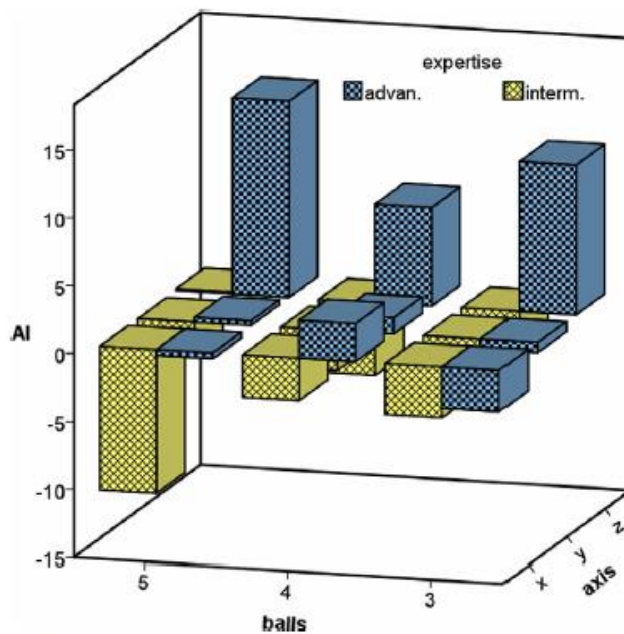


Fig. 2. Mean asymmetry indexes (AI) divided for level of expertise (ANOVA, $p = 0.025$), number of balls ($p > 0.05$) and axis ($p = 0.07$).

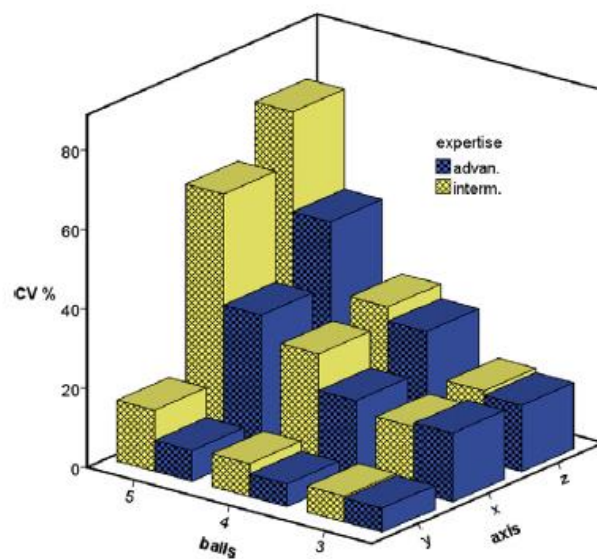


Fig. 3. Mean spatial CVs divided for level of expertise (ANOVA, $p = 0.003$), number of balls ($p < 0.001$) and axis ($p < 0.001$).