

聴覚フィードバックを用いたジャグリングスキル向上支援システム

萬 絵¹ 加藤岳大¹ 横窪 安奈¹ ロペズ ギョーム¹

概要: ジャグリングは大道芸やサーカスなどの曲芸として古くから世界中で親しまれており、近年ではスポーツとしても注目されている。しかし、初級者がジャグリングを上達するには、基本的な動きであっても難しい。本研究では、聴覚フィードバックによるジャグリング動作上達システムの提案と評価を行った。評価実験により、ジャグリングの基本動作においては、単音による聴覚フィードバックよりもリズムを持つ曲での聴覚フィードバックの方が技能習得支援に効果的であることが示唆された。

Auditory Feedback System to Encourage Improvement of Juggling Skills

Kai Yorozu¹ Takehiro Kato¹ Anna Yokokubo¹ and Guillaume Lopez¹

1. はじめに*

ジャグリングは大道芸やサーカスなどの曲芸として古くから世界中で親しまれており、近年ではスポーツとしても注目されている。しかし、初級者がジャグリングを上達させることは、基本的な動きであっても難しく、ハードルが高い[1]。ジャグリング動作の中でも3ボールカスケードと呼ばれる動作は、3つのボールをリズムカルに投げ上げる、浮いているボールを3次的に管理する、両手を均等に用いる動作であるなどの複雑な要素を含んだ動作である。継続時間などを用いて熟練度を定量化できることから技術獲得やスポーツ科学の分野で取り上げられている[2][3]。

本研究では、ジャグリングにおける身体技術の習得を支援するために、動作の分析によって熟練者の潜在的な技術を明確にし、聴覚フィードバックを初心者に提示することで上達を促すための、ジャグリングスキル向上支援システムを提案して評価した。また、本研究では3ボールカスケード動作を以下のように定義し、以後カスケード動作と表記する。

1. 右手から開始する場合、右手にボールを2つ、左手にボールを1つ持つ。
2. 右手にあるボールの内、1つのボールのみ右から左手へトスする。
3. 浮いているボールの内側から左手で右手にボールをトスし、落下したボールを左手でキャッチする。
4. 左手も3と同様の手順で、ボールの内側から右手で左手にボールをトスし、落下したボールを左手でキャッチする。
5. 3と4の手順を繰り返し行う。

2. 関連研究

市川らは、ボールジャグリングのなかで最も基本的な身体スキルとされているカスケード動作に着目し、初級者と熟練者での身体動作の安定性及び各熟達段階での身体動作の解明に取り組んだ[4]。しかし、カスケード中の身体動作を計測するためには、赤外線カメラを用いたモーションキャプチャを用いていることに加え、左右の手首、肘、肩、腕などの計7ヶ所に反射マークを取り付ける必要があるため、支援システムを想定したときには有用な環境であるとは言いがたい。また、昨今では加速度センサが携帯情報端末に内蔵されているため、身体にマークを装着しなくても、身体動作を計測することが可能である。

Knightsらは、加速度センサをスポーツのトレーニングとして使用するために、学習用フィードバックとしての可能性を議論しており、加速度センサを用いて、ユーザの身体動作を把握し、トレーニングの有益であることを示唆している[5]。また、卯田らは、スマートフォンの加速度センサ値から周波数解析を行い、リフティングスキル評価に有益な特徴量を実験を通じて明らかにした[6]。このように、加速度センサを利用した動作分析は様々な領域で取り組まれている。身体動作のトレーニングに対して、聴覚フィードバックを与えた研究として奥川らの研究が挙げられる[7]。

これは自転車のペダリング周期のリズムから動作の分析を行い、ペダルの回転速度に応じて聴覚フィードバックを提示することで初心者動作を改善することに成功した。このように、聴覚フィードバックによる手法はトレーニングにおいて有益であることが示唆された。以上を踏まえ本

¹ 青山学院大学
Aoyama Gakuin University

研究では、加速度センサを用いてジャグリングの身体動作を分析し、聴覚フィードバックを与えることで初心者者の技能支援となることを明らかにする。

3. ジャグリングスキル向上支援システム

3.1 システム概要

ジャグリングにおける3ボールカスケード動作のスキル習得を支援するために、熟練度の基準となる奥行の手のブレに関して、3種類の聴覚フィードバックをリアルタイムで被験者に与えることで、初級者の動作を熟練者の腕の動作に近付けるためのジャグリングスキル向上支援システムを提案する(図1)。提案システムでは、スマートウォッチの加速度センサで身体動作を取得し、身体動作の特徴量の最大ピーク値と最小ピーク値を抽出する。抽出した特徴量をスマートフォンへ送信することで、スマートフォン内で分析を行い、身体動作に対応する音源を再生することでユーザにフィードバックを行う。また、提案システムを実装するにあたり、スマートフォンは製の Motorola 社製の MotoG, スマートウォッチは Motorola 社製の Moto360 を使用した。Moto360 内蔵の加速度センサのサンプリング周波数は 50Hz であった。

提案システムの利用手順について詳細に述べる。まずはじめに、ユーザにスマートウォッチを装着させる。次に、スマートウォッチの加速度センサで身体動作を取得し、身体動作の特徴量の最大ピーク値と最小ピーク値を抽出する。抽出した特徴量をスマートフォンへ送信することで、スマートフォン内で分析を行い、身体動作に対応する音源を再生することでユーザに聴覚フィードバックを行う。

3.2 カスケード動作におけるピーク値の算出

田中らによると、カスケード中の奥行に当たる軸の動きのブレが熟練度に影響していることが示唆されている[1]。そこで、提案システムでは、周期毎に x 軸の加速度の最大値と最小値を、閾値を用いて抽出した。ピーク値を抽出した結果を図2に表す。また、提案システムでは、カスケード動作は3投で各ボールが1順する周期性の動作であることを考慮し、フィードバックの間隔は最大ピーク値が3回検出される毎に実行されるようにした。

3.3 聴覚フィードバックの設定

初級者へのフィードバック手段として、振動や視覚、聴覚などが挙げられるが、カスケード動作は複雑な動作であることから、振動は知覚しにくく、動作の妨げとなるため不適切であると考えた。加えて長谷川らの研究から、視覚フィードバックに比べて聴覚フィードバックの方が運動学習に優れていることが示唆されていた[8]。

そこで提案システムでは、初級者がフィードバックを知覚し易いよう、音が2回鳴るという単純なフィードバックと、ピーク値の標準偏差に対応して音に変化するフィード

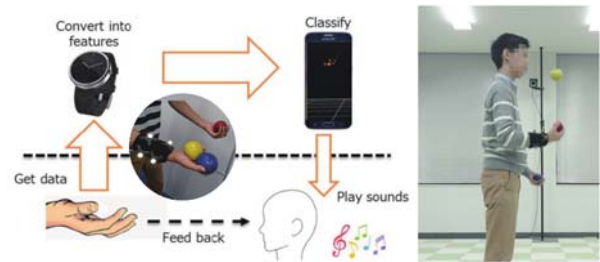


図1 ジャグリングスキル向上支援システムの構成イメージ

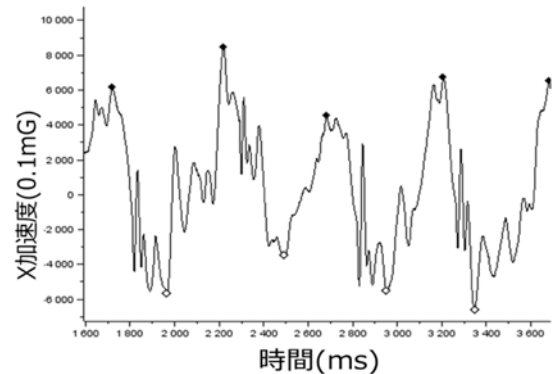


図2 ピーク値の抽出結果

表1 標準偏差に対応する聴覚フィードバックの種類

	T>Pmax	T<Pmax
T>Pmin	294Hz→294Hz	196Hz→246Hz
T<Pmin	246Hz→196Hz	147Hz→147Hz

バックの2つを採用した。表1は、標準偏差に対応する聴覚フィードバックの種類である。これはピーク値の標準偏差を基準として、閾値(T)より上回った場合、もしくは下回った場合に音に変化する。また、位置最大ピーク値(Pmax)の標準偏差が最初の音程を決定し、位置最小ピーク値(Pmin)の標準偏差が後半の音程を決定している。

4. 評価実験

4.1 聴覚フィードバックを用いた実験

聴覚フィードバックを用いた実験では、カスケード動作中に聴覚フィードバックを与えた際の被験者への影響を検証した。被験者は男子大学生5名を対象とし、内3名はジャグリング初級者、2名はジャグリング熟達者であった。本実験では、まず、被験者の腕に加速度センサとモーションキャプチャに用いるマーカを装着よう指示した(図3)。次に本実験で与えるフィードバックの説明を行い、カスケード動作を100投程度行うよう指示した。カスケード動作を行う際には、装着した加速度センサにより腕の動作の情報を取得した。

最後に、聴覚フィードバックを与えた状態で100投程

度カスケード動作を行うよう指示し、加速度センサから腕の動作の情報を取得した。なお、モーションキャプチャのサンプリング周波数は 120Hz であった。また、加速度センサは AndroidWatch を、マークは Motive を使用した。

4.2 実験結果

各被験者の腕の加速度信号のうち、奥行を表す x 軸のピーク値を抽出し、窓長 5 サンプル、シフト長 3 サンプルで標準偏差を算出した。これらの平均をフィードバック前後で比較した結果、値が大きいく程、腕の前後のブレが大きく熟練度が低いことが明らかになった。なお、検定にはウェルチの t 検定を用いて平均の差に有意があるか検証を行った。結果を表 2、表 3 に示す。

表 2 より、最大ピーク値において差に有意が認められた被験者はいなかった($p < 0.05$)。また、フィードバック前に比べてフィードバック後の標準偏差が増加した被験者が 4 名であった。また、表 3 より、最小ピーク値において差に有意が認められた被験者は 2 名であった($p < 0.05$)。しかし、有意が認められた 2 名のうち、初級者 1 が最小ピーク値が減少したのに対し、初級者 2 は増加する結果となった。また、フィードバック前に比べてフィードバック後の標準偏差が増加した被験者が 4 名であった。

モーションキャプチャから取得した位置情報からの分析を行った。カスケード動作において、身体を中心に最も近づく点、すなわち位置最大ピーク値 (Pmax) がトスに関係し、身体から最も離れた点、すなわち位置最小ピーク値 (Pmin) がキャッチに関係していると考えた。そこで、身体に平行な軸の最大値と最小値を特徴点として抽出し、その地点のベクトル量の標準偏差を手のブレであるとして分析を行った。加速度の算出と同様に、ウェルチの t 検定を用いて平均の差に有意があるか検証を行った。結果を表 4、表 5 に示す。

表 4 より、最大ピーク値において差に有意が認められた被験者は 2 名であった($p < 0.05$)。しかし、有意差がある被験者のうち 1 人はフィードバック前に比べてフィードバック後の標準偏差が増加し、もう一人は減少した。また、熟練者 1 と 2、及び初級者 1 はフィードバック有で値が減少していたが、初級者 2、3 は値が増加した。

表 5 より、最小ピーク値において被験者のうち全員の差に有意が認められた($p < 0.05$)。しかし、最大ピーク値と同様に熟練者 1、2、初級者 1 はフィードバック有で値が減少したが、初級者 2、3 は値が増加した。

4.3 フィードバック音の比較実験

フィードバック音の比較実験では、4.1 節で用いた単音とは異なり、2 種類のフィードバックを用意し、フィードバック有の時とフィードバック無の時の差を比較した。フィードバックの内容は以下の 2 種類である。

① フィードバック A

フィードバック A は、カスケード動作の状態が適切なの



図 3 加速度センサ及びマーカ装着位置

表 2 加速度最大ピーク値の標準偏差(単位:m/s²)

	無	有	p 値
熟練者 1	0.85	0.87	0.86
熟練者 2	1.08	1.12	0.78
初級者 1	3.35	2.49	0.10
初級者 2	1.31	1.34	0.89
初級者 3	1.36	1.66	0.12

表 3 加速度最小ピーク値の標準偏差(単位:m/s²)

	無	有	p 値
熟練者 1	1.10	1.23	0.34
熟練者 2	1.53	1.65	0.38
初級者 1	3.69	2.53	0.02
初級者 2	1.62	2.05	0.08
初級者 3	1.32	1.60	0.20

表 4 位置最大ピーク値のベクトル量の標準偏差(単位:m)

	無	有	p 値
熟練者 1	0.089	0.050	0.000
熟練者 2	0.090	0.109	0.085
初級者 1	0.089	0.068	0.070
初級者 2	0.045	0.114	0.000
初級者 3	0.068	0.088	0.081

表 5 位置最小ピーク値のベクトル量の標準偏差(単位:m)

	無	有	p 値
熟練者 1	0.132	0.082	0.000
熟練者 2	0.193	0.091	0.000
初級者 1	0.111	0.079	0.001
初級者 2	0.090	0.132	0.001
初級者 3	0.098	0.166	0.000

か、不適切なのかを提示するために、音の快不快度を変化することにより、聴覚フィードバックとして被験者に知覚させる。

② フィードバック B

フィードバック B は、音の区別のし易さを向上するため

に被験者がトレーニングを始めたタイミングで提案システムから曲が流れるフィードバックである。カスケード動作が適切な場合は曲が流れ続け、カスケード動作に改善すべき点があった場合は、以下のフィードバックを行う。

- トスにブレが大きい → 高音の単音
- キャッチにブレが大きい → 低音の単音
- 音楽の停止 → 音楽の停止

上述の聴覚フィードバックにより、被験者のカスケード動作が適切な場合はフィードバックをする知覚する必要性は無い。一方、スケード動作が不適切な場合は、曲が停止しないよう意識するため、トスとキャッチのフィードバック音の区別だけを知覚できるようになっている。なお、本実験では、提示する曲にカノンを用い、テンポについては、カスケード動作において熟練度に依存しないテンポとされている約 93BPM とした。

本実験の手順は以下の通りである。まず最初に、被験者に音に関するアンケートに答えるよう指示し、動作計測を行うためにスマートウォッチ（Android Watch）とマーカ（Motive）を右腕に装着するよう指示した。次に、カスケード動作を 100 投程度行うよう指示し、腕の動作情報を取得した。カスケード動作を行う際には、2 種類のフィードバックを用いた。最後に被験者には本実験に関するアンケートに回答してもらった。アンケートは 8 種類の音源を聞いてもらい、順位付けを行う内容であった。

4.4 実験結果

本実験により取得した腕の加速度データから、x 軸加速度最大ピーク値標準偏差 (Smax), x 軸加速度最小ピーク値の標準偏差 (Smin), 1 周期の動き、モーションキャプチャーシステム (Mocap) から取得した座標データから Pmax, Pmin の抽出を行った。また、ジャグリングスキルに関するアンケート結果として、図 4 にはフィードバック A の結果を、図 5 にはフィードバック B の結果を、図 6 には快不快音に関するアンケートを示す。示す図 4 より、フィードバックに対してポジティブな回答が多く見られた。しかし、フィードバックを受けて動作を変化させることで良いフィードバックが増えたと感じた人が多い中、カスケード動作自体の改善を感じないと回答する人が多かった。図 5 より、フィードバック A と同様にポジティブな回答が多く見られ、フィードバック A に比べてそう思う、非常にそう思う、の回答が増加した。

また、図 6 より、設定されたフィードバック音で、不快の項目に設定された音のうち最も多い音は音 4 で全体の 100%。やや不快の項目に設定された音の中でもっとも多い音は音 3 で全体の 70%であるのに対して、快の項目の場合は音 7 で全体の 50%。やや快の項目の場合は音 5 で全体の 30%であった。

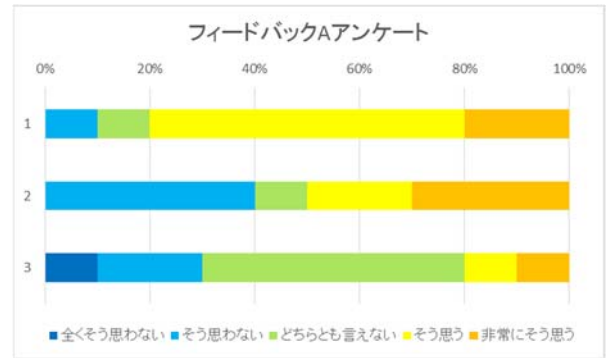


図 4 フィードバック A のアンケート結果

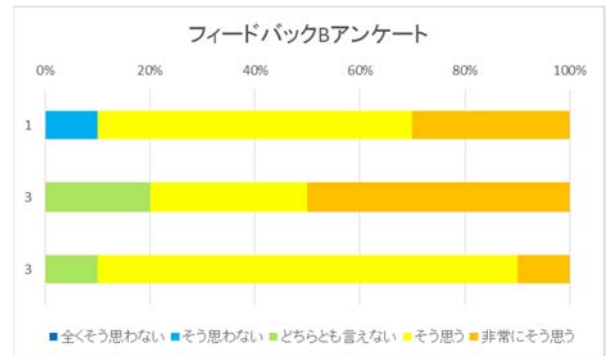


図 5 フィードバック B のアンケート結果

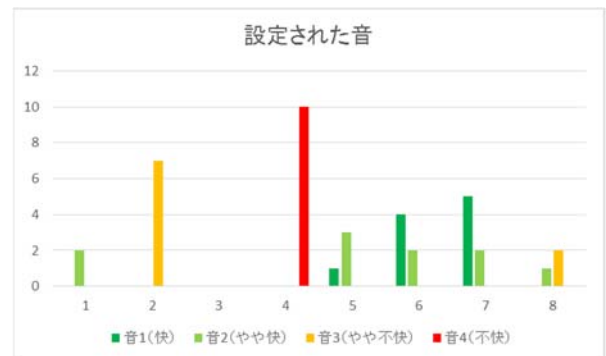


図 6 快音不快音のアンケート結果

5. 考察

5.1 聴覚フィードバックの提示の有用性

4.2 節の実験結果より、フィードバック無し時に最も標準偏差の値が大きい初級者 1 が、最も減少の影響が大きいことから、初級者の中でも特に手のブレが大きな初級者に対してシステムが有効に作用する可能性が示唆された。熟練者 1 と熟練者 2 はフィードバックを与えられた後も、加速度値の変化が少ないのに対し、初級者 2 と初級者 3 はフィードバックを与えられた際の影響が大きい結果が得られていた。これは初級者がフィードバックを得たことにより、カスケード動作を一度やり直したことが考えられる。そのため、初級者には長期的にフィードバックを与えるトレーニングを行うことで、カスケード動作の基礎を構築できるのではと考えられる。

5.2 聴覚フィードバック音の効果検証

4.4 節の実験結果より、加速度情報から取得した座標からの分析、ならびに DTW による類似度の分析を行った。

加速度情報から取得した座標からの分析では、多重比較を行った結果、フィードバック A において被験者 8 のみ Pmax が有意に減少した ($p < .05$)。フィードバック B において被験者 8 のみ Pmax, Pmin が有意に減少した。以上から、提案システムからフィードバックを与えた際には、座標情報からは変化を得られにくいということがわかった。しかし、4.2 節の結果より、加速度情報から得られたデータは有意であったことから、大きな位置変化ではなく微細な動作変化を与える可能性があると考えられる。結果を表 6 に示す。

また、DTW による分析では、交互作用に有意があったため、フィードバックを主要因とした平均の差に有意があるかはわからなかった。多重比較を行ったところ、有意水準 5% で有意な差を示したのは被験者 2, 3, 7, 8, 10 であった。しかし、被験者 3, 7 はフィードバック A, B 共に類似度が増加し、被験者 2 もフィードバック A において増加した。被験者 8 はフィードバック B において、被験者 10 はフィードバック A において減少した。前述の Smax, Smin の結果と、アンケートから得られた被験者の熟練度を合わせて今回の結果と照らし合わせた結果、連動性が見られなかった。そこで、本実験内でどれほど同じ動きをしていたかという特徴を算出し比較を行おうと考え、各実験中の投球データの中で最も類似度の高い 1 投を教師データとしてその他の投球データの類似度を算出し、比較を行った。その結果、熟練者の投球との類似度の比較と、自身の投球との類似度の比較結果を見比べてもほとんど有意差に連動性は見られなかった。以上から、熟練者の腕の動きは腕の動きが常に一定になるのに適した動きというわけではないという可能性が考えられる。

しかし、フィードバック音については、フィードバック音の不快感が関係していると考えられる。なぜなら、フィードバック A において Smin は有意に減少したが、Smax においては有意差がないものの通常に比べ増加していた。このことから、最も不快である音 4 を優先的に止めるためにトスの改善を優先し、キャッチの改善がおろそかになっているという可能性が挙げられる。そのため、フィードバック B のほうがトス、キャッチとも改善し易いと被験者は感じたと考えられ、Smax, Smin という特徴が有意に減少するほどの改善に至らなかったと考えられる。

6. まとめと今後の展望

本研究ではジャグリングにおけるカスケード動作スキルを向上するために、聴覚フィードバックを用いたジャグリングスキル向上支援システムを提案して評価した。提案

表 6 Pmax, Pmin 比較結果

	N	平均	標準偏差
Pmax	21.0	0.032	0.26
Pmin	21.0	0.072	0.03

システムでは、熟練度の基準となる奥行の手のブレに関して 3 種類の聴覚フィードバックをリアルタイムで被験者に与えることで、初級者における 3 ボールカスケードの動作を熟練者の腕の動きに近付けることが可能になるかを実装し、検証した。評価実験では、最初に単音を組み合わせた聴覚フィードバックを実装し被験者に与えることで動作にどのような影響が現れるかの検証を行った。分析には腕の加速度信号と座標情報のピーク値を取得し、その値から奥行の手のブレを示す特徴量をトスとキャッチの 2 点で算出し分析した。結果として奥行の手のブレを示す特徴量は悪化の値を示した。問題点としてフィードバック音が知覚しにくく、カスケード動作に反映するまでに混乱してしまうという仮説を立てた。この問題を解決するために、フィードバック音を快または不快に依存させる手法と、曲を流し再生停止を用いて認識しやすさを向上させる手法を実装し、再度実験を行った。結果として前者のフィードバックではトス時の動作改善を有意に得られ、その他の特徴でも改善の傾向が見られた。聴覚フィードバックを与えることによってトス時に改善を示せたが、改善しづらいとされているキャッチの動作改善を有意に示せなかった。また、特徴点の分析のみを実施したため、一連の動きとしての動作分析を実施する必要がある。今後は、一連の動きとしての動作分析とその改善が行えるフィードバックの実装や、フィードバックを長期的期間与えた際に改善を見込めるかなどを検証していきたい。

参考文献

- [1] 田中彰吾, 小河原慶太: 身体知の形成: ボールジャグリング学習過程の分析, 人体科学会, 19(1):69-82 (2010).
- [2] 村尾和哉, 寺田努: 加速度センサを用いた複合的動作の認識手法, 情報処理学会研究報告, Vol.2012-MBL-61, No. 20, pp. 47-54 (2012).
- [3] Murofushi, K., Sakurai, S., Umegaki, K., et al., "Development of a System to Measure Radius of Curvature and Speed of Hammer Head During Turns in Hammer Throw," International Journal of Sport and Health Science, 3:116-28 (2005).
- [4] 市川淳, 三輪和久, 寺井仁: ノービスによる身体スキルの獲得: 身体動作の安定性と着地点からの検討, 日本認知科学会, pp.406-412 (2014).
- [5] Knight, J.F., Bristow, H.W., Anastopoulou, S., et al., "Uses of accelerometer data collected from a wearable system," Personal and Ubiquitous Computing, 11(2):117-32 (2007).
- [6] 卯田駿介, 馬場哲晃, 串山久美子: スマートフォンを用いたボールリフティングスキル自動評価手法の検討, エンタテイメントコンピューティング, 2015-EC-35(15), pp.1-5(2015).
- [7] 奥川遼, 村尾和哉, 寺田努, ほか: 聴覚フィードバックを利

用したペダリングトレーニングシステム, コンピュータソフトウェア, Vol29, No.1, pp78-84 (2015).

- [8] 長谷川直哉, 萬井太, 武田賢, ほか: 視覚フィードバックと聴覚フィードバックによる動的バランスの学習効果の違い, 理学療法学, 42 巻第 6 号(2015).