

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700714

研究課題名(和文)バレエの回転動作のバイオメカニクス研究 回転を生み出す体肢の協応運動に着目して

研究課題名(英文)Mechanics of turns around the longitudinal axis of the whole body.

研究代表者

井村 祥子 (Imura, Akiko)

東京大学・総合文化研究科・助教

研究者番号：30586699

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円、(間接経費) 750,000円

研究成果の概要(和文)：クラシックバレエのピルエットについて、モーションキャプチャーシステム及び床反力計を用いて、ロシア人男性プロバレエダンサー5名及び日本人女性プロバレエダンサー10名のデータを取得し、逆動力学的手法により回転の生み出し方について調べた。平均回転数は男性4回転、女性2回転であった。動作開始時の両上肢の水平面内の回転で、全回転分の角運動量が得られた。女性ダンサーはこの時上体が正面から回転し、それを引き止める支持脚のトルクが回転を妨げる。よって開始時は下肢や上体を回転させず、床からのトルクを上肢に伝える必要がある。また回転数を上げるには、上腕を体幹に引き付け遊脚の位置を下げて対処する。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study was to investigate the mechanics of pirouette in classic ballet on generating the angular momentum around the vertical axis of the whole body. Five Russian male and ten Japanese female dancers performed pirouette. Motion capture system and force platforms recorded them to analyze by an inverse dynamic method. The male dancers performed four turns and the female dancers performed two turns in one pirouette on average. The angular momentum for all the turns was generated at the beginning of the pirouette by a twisting torque from the floor during the arm rotation in the horizontal plane. Then the female dancers also rotate their upper trunk. To correct this trunk distortion, the hip joint torque of the support leg pulled back the pelvis to the front. Thus the twisting torque has to be exerted only by the arm rotation. To perform many turns by one kick in a pirouette, the dancer adducted both upper arms in the horizontal plane and the pull down the gesture leg.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学、スポーツ科学

キーワード：バレエ バイオメカニクス 逆動力学 体幹長軸回りの回転 角運動量

1. 研究開始当初の背景

バレエ作品において、体幹長軸周りの回転技は多くの見せ場で用いられ、ダンサーが習得すべき動作の一つである。回転技の習得は体肢の運動が複雑になるほど困難であるが、基本的な技でも身体の使い方を正確に解説した指導書は見られない。この背景には、回転技を含めバレエ動作の分析自体が進んでいないことが挙げられる。



図1:ピルエット(右 左の順に行う)

片足接地で行うバレエの最も基本的な回転動作は、ピルエットである(図1)。両脚の接地状態で両上肢を大きく広げ、片脚で爪先立ちをするときにそれらを抱え込むようにして回転する。一回の蹴りで多くの回転ができることは、体幹長軸回りの回転動作での回転の生み出し方、ダイナミックな運動での片脚支持によるバランス保持能力などの点で汎用性が高い。こうした片脚支持によるその場での回転は、円盤投げのリリース局面や(Miyanishi & Sakurai,1999)、歩行の方向転換時の動作分析の研究(Xu et al.2006; Orendurff et al., 2007)が行われているが、体幹の回転を生み出す下肢の運動の仕組みは説明されていない。

バレエのフェッテターの連続回転では、逆動力学による分析から、床と足との摩擦を利用して上肢と遊脚を振り回す運動で連続回転を生み出すことが分かった(Imura et al.,2008)。ピルエットにおいても同様の手法で全身の動作分析を行い、その技術習得のポイントを明らかにすることが可能である。

2. 研究の目的

基本的な回転技であるピルエットを調べ、バレエの回転動作中の体肢の運動を明らかにする。特に体肢の協調運動において、その意味と効果を検証する。

より洗練されたピルエットの特徴は、一回の蹴りで多回転を行う(角運動量の取得)

回転中に転倒することがない(回転中のバランス保持)

である。これらの点をクリアしたピルエットにおける体肢の協調運動を調べる。

3. 研究の方法

被験者：ロシア人男性プロバレエダンサー5名・日本人女性プロバレエダンサー10名。

実験設備：床面に固定可能な床反力計2台と光学式モーションキャプチャシステム(カメラ8台)。床反力計はカメラと電的に同期し、1台につき片脚のデータを収集する。

プロトコル：適度なウォーミングアップ後に、

試技の撮影と床反力データの収集を行う。身体の変数を変数とするために、反射マーカーをダンサーの全身の解剖学的指標に貼付する。ピルエットの他に、股関節中心位置を求めるための下肢の分回し運動も撮影する。

ピルエット:自由なテンポで連続1,2,3回転、それ以上の回転数を失敗の試行が続くまで床反力計の上で行う。ロシア人男性ダンサーは6回転以上、日本人女性ダンサーは2~4回転することができた。

分析:逆動力学法による動作分析を行った。モーションキャプチャ後、取得した身体各部の三次元座標にフィルター(butter-worth low pass filter)を施し、その後身体各セグメントの質量中心速度、角速度等の運動学的変数を算出した。また運動学的変数を算出するための身体慣性データは、日本人については阿江らの、ロシア人についてはZatsiorskyの人体モデルを用いた。得られた運動学的変数及び床反力、足圧中心位置及びフリーモーメント(床と足の間に生じる摩擦によるトルク)から、各セグメントに作用したトルクやその角運動量を算出した。得られたトルクは各関節に設置した関節座標系に投影し、関節トルクとして求めた。これらの計算では、全身の角運動量の微分とフリーモーメント(床との摩擦:足底を鉛直軸周りに回転させるトルク)と床反力によるモーメントの一致度を確認して正確性を確かめた。こうして計算したデータから、回転力の生み出し方について、全身の角運動量、フリーモーメント、上肢及び下肢の身体長軸回りの各関節トルクを求めて検討した。回転の開始は両脚の接地中に上体のターン方向の回転が始まる時点とし、遊脚による床の蹴りをキック、回転後再び遊脚が接地し回転が終了する時点landとした(図2)。報告するデータでは、トルクは身長と体重、角運動量は身長

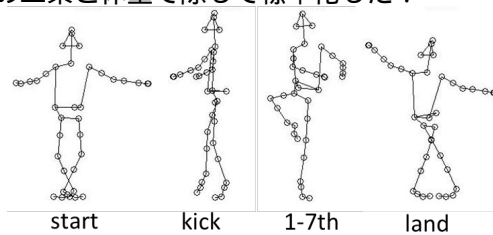


図2:ピルエットのフェイズ分け

4. 研究成果



図3: 全身の角運動量の微分(d/dtH)とフリーモーメント及び床反力によるモーメント(赤線)

(1)全身の角運動量

図3は代表的なダンサーによる7回転中の全身の角運動量とフリーモーメントと床反力によるモーメントとの一致度を確かめた結果である。両者の一致度から本研究目的に対し分析は妥当に行われたことがわかる。

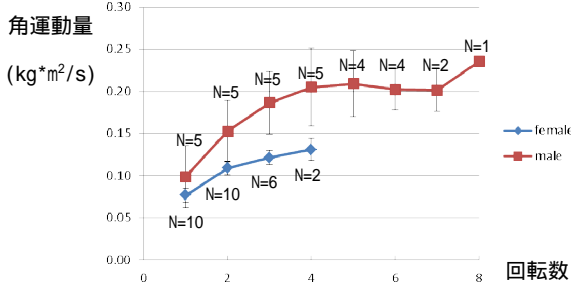


図4: 角運動量のピーク値(男女別)

女性の平均回転数は 2.1 ± 0.9 回転, 男性は 4.1 ± 2.0 回転であった。女性で4回転以上回ったものはいなかった。角運動量は始めの両上肢が回転方向に動き出してから遊脚で床を蹴るまでの間で最大値となった(図4)。この時の角運動量を男女別にプロットすると, 男女とも1回転の場合は角運動量が小さく, 2-4回転までは比例的に大きくなった。男性では4回転以上のピルエットでは角運動量はほとんど変化しなかった。このことから, 1回転と, 2回転, また4回転以上のピルエットでは動作様式が異なることが推測された。

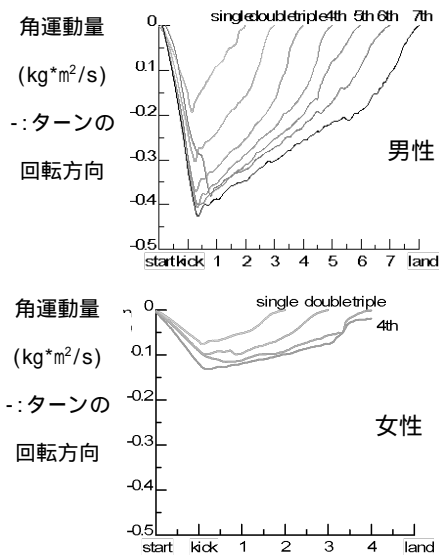


図5: 角運動量の変化(男女別)

角運動量は男女ともキックの時点でピークとなったが男性では回転数が多くなるにつれてそのタイミングがやや遅れていった。スタートからキックまでの角運動量は男性のほうが女性より急激に変化した。よってピルエットの回転はスタート時の上体及び上肢の水平面内の回転時にその後全ての角運動量が生み出されることが分かった。その後は, 男女ともに最終回転の1回転前まで直線的に減少した。図3の結果をふまえるとこの原因は, 一定のフリーモーメント及び床反力によるトルクが身体に摩擦として作用し回転を

妨げるためであると考えられる。

(2)回転の生み出し方

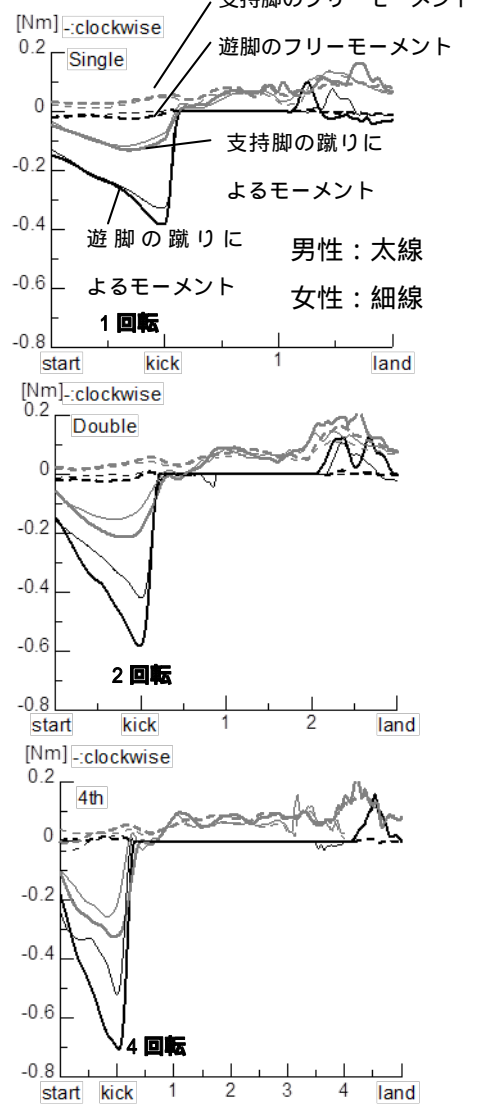


図7: 1,2,4回転のピルエットにおける床反力によるモーメント(-:ターンの回転方向)

1,2,4回転の全てにおいて, 主に遊脚の床の蹴りによる身体重心周りのトルク(TCG)がターンの回転方向への角運動量を獲得させていた。1回転では同トルクの大さの男女差は顕著に表れていないが, 2回転以上では支持脚遊脚の両方で男性のほうが大きい。一方各脚に作用するフリーモーメントは回転を止める方向に作用し, 男女差がみられない。TCGの大きさが回転数を多くするための一要因であることが推測された。

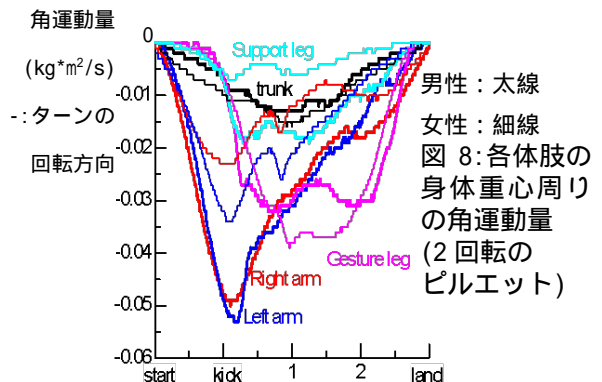


図8: 各体肢の身体重心周りの角運動量(2回転のピルエット)

図8から、回転のスタートからキックまでの間に両上肢の角運動量が大きくなり、その後それらが体幹や下肢へ移動すると考えられた。体幹の角運動量は男女ともに大きな差がないが、両上肢及び支持脚の角運動量は男性の方が大きい。回転始めに得られる角運動量で全ての回転を生み出すことを考えると、回転始めの両上肢の角運動量がピルエットの回転数を決めていると考えられる。体重と身長で標準化した値でも男性のほうが両上肢の角運動量が多いのは、男性ではこの両上肢の水平面内の回転が速いことが原因であると推測される。

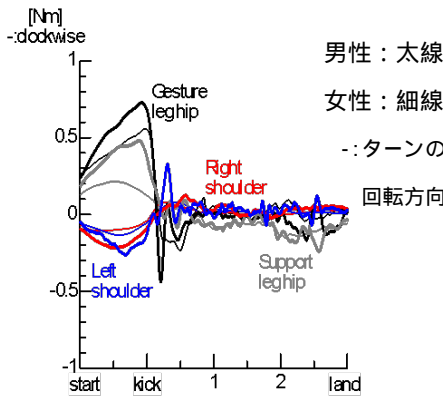


図9: 各体肢の関節での鉛直軸周りのトルク(2回転のピルエット)

図7,8の結果もふまえると、スタートからキックの間は両股関節周りで大腿に回転とは逆方向にトルクが作用して下肢や体幹がほとんど回転せず、回転方向の角運動量を得るためのフリーモーメント及び床からのトルクは上肢により生み出されていたと考えられる。

同局面の肩関節では上肢をターンの方に回転させるトルクが作用し、上肢の角運動量が増加した。体幹や両下肢の運動がほぼ見られなかったことから、両上肢の回転が床から身体に回転を促すトルクを引き起こし、その角運動量を増加させたと考えられる。キック直後に左肩で回転とは逆方向のトルク(水平内転トルク)が作用したが、この反作用は上体をターンの方に回転させるトルクである。これにより上肢の角運動量が体幹へ移動し、体幹の回転が起こったと考えられる。同様にキック直後遊脚股関節回りでは大腿をターンの方に回転させるトルクを作用させ、その角運動量が増加して1回転目が起こる。

男女の差は各トルクのピーク値の他に、スタートからキックまでの局面の下肢のトルクに見られた。遊脚の股関節で作用するターンの回転方向のトルクが男性はキック直後の一瞬で作用するのに対し、女性は1回転目の半分まで作用した。支持脚の同トルク(内旋トルク)も、男性では1回転目の半分までほぼ作用していないが女性ではそのトルクが大きい。これらの違いは体幹と両下肢との回転速度の違いに要因となる可能性がある。

(3)回転の維持

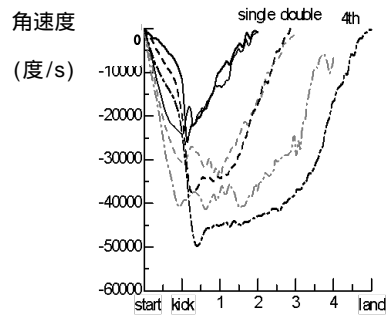


図10: 上体の回転速度

上体の回転速度は女性では遊脚が床を蹴る(キック)タイミングでピークとなり、男性では回転数が多くなるにつれてそのタイミングが遅くなっていた。また上体の回転速度は女性ではスタート時から徐々に大きくなり、キックから最終回転が終わるまで多少の増減があるが回転速度は大きく変化しないが、男性ではキック前後に集約して大きくなり、その後最終回転が終わるまであまり変化しないという違いが見られた。キック直後に男性の上体の回転速度が大きくなるのは、左肩関節の大きな水平内転トルクの影響であると考えられる。また女性ではスタート直後から上体の回転が始まっているため、下肢に作用した床からのモーメントの一部が体幹の回転に作用してしまい、上体の前面がキック時にあるべき正面の位置に向いていない可能性がある。女性で作用していた支持脚のキック後から1回転目の内旋トルクはこの時の体幹の回転を引き留めるものであると考えられ、回転を生み出す動作として合理的であるとは言い難い。

(4)回転数による身体長軸回りの慣性モーメントの違い

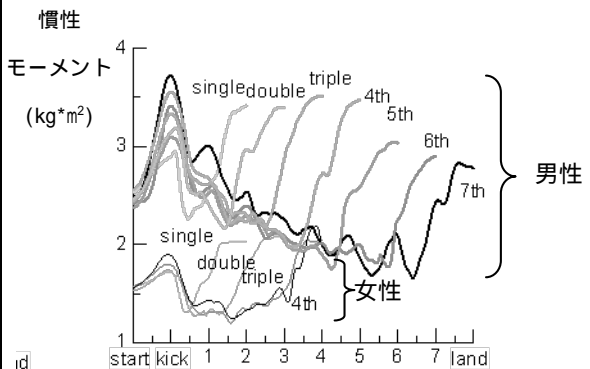


図10: 身体重心を通る長軸周りの全身の慣性モーメント

図5から、回転始めに得られた角運動量は回転中に増加せず支持脚に作用する床からのトルクによって減少する。しかし、男性のピルエットの角運動量のピーク値を見ると、4回転以上のピルエットでは角運動量のピーク値はそれほど変化しない。男性のピルエットでは角運動量のピークを大きくせず回

回転数を多くするために、身体長軸回りの全身の慣性モーメントを1回転ごとに減少させていた。この慣性モーメントの変化は度の回転においても主に両肩関節で上肢を引きつける運動に由来していた(図11)。しかし5回転以上の回転では、大腿の水平面内の角度は変えずに遊脚の膝関節をあまり屈曲しないことで遊脚の位置を下げ、慣性モーメントを小さくしていた。

回転速度を落とさないために行われるこうした代償動作のために、鉛直軸周り以外の回転が生じ、そのことが転倒につながる可能性もある。この時のバランス維持の方法に関して今後の調査が必要である。

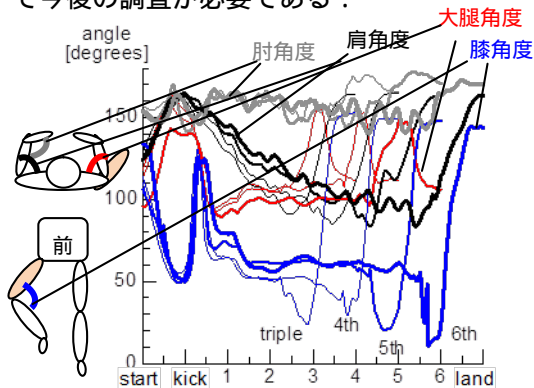


図11 両肩・遊脚股関節及び膝関節の角度
(5)まとめ

クラシックバレエのピルエットの回転の生み出し方について、逆動力学的手法により全身の鉛直軸周りの角運動量とそれを生み出すトルクについて調べた。全身の鉛直軸周りの角運動量は、ピルエットの開始時に行われる両上肢の水平面内の回転によりすべての回転の角運動量が得られていた。この時、両上肢を回転させるだけでなく、両股関節で回転とは逆方向にトルクを発揮し下肢の回転を止めておき、床からのトルクを上肢に作用させることが重要である。また開始時に男女では上体の回転速度の増加に違いが見られ、女性では上肢の回転とともに上体も少しずつ回転してしまうことが分かった。このことは下肢に作用させた床からのトルクを上体にも作用させて上肢で増加させるべき角運動量を減らしてしまう。また回転初期に正面にあるべき上体の位置からずれることによって、その後遊脚のキック時に支持脚股関節で回転を止めるトルクを発揮することになる。このことはその後の回転に使われる角運動量の減少を引き起こし、回転数の減少につながる。

回転の維持のために、男性では回転中に全身の鉛直軸周りの慣性モーメントを小さくすることがわかった。この運動は主に両上肢を両肩関節の水平内転によって体幹に引き付けることによっておこなわれるが、5回転以上になると遊脚の位置を下げることで対応することがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[学会発表](計 1 件)

A. Imura and T. Kojima
STRATEGY OF BALANCE CONTROL DURING
PIRUETTE IN CLASSICAL BALLET.

The 31st Conference of the International
Society of Biomechanics in Sport.

Taipei, Taiwan, in 7th-11th July, 2013

6. 研究組織

(1)研究代表者

井村 祥子 (IMURA Akiko)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：30586699