

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K10819

研究課題名(和文)片脚支持爪先立ち及び回転動作における動的バランス調整機構についての動力的解析

研究課題名(英文)Dynamic balancing mechanism in pirouette

研究代表者

井村 祥子 (Imura, Akiko)

東京都立大学・人間健康科学研究科・助教

研究者番号：30586699

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：バレエの鉛直軸周りの回転動作では、転倒しないよう重心の水平移動や前後左右軸周りの角運動量が調整される必要がある。本研究の目的は、重心移動及び転倒の角運動量に対する動力的貢献を調べ、片脚支持回転動作におけるバランス調整方法を明らかにすることである。ダンサーによる4回転までの片脚支持回転動作について、逆動力学演算を行い関節トルクを求め全身の運動方程式を用いて重心の水平移動及び支持脚足圧中心周りの角運動量における関節トルク・運動依存項・重力項の貢献を求めた。回転数の増加に伴い、重心の前方移動は減少し、爪先立ち時の前後回転の角運動量が減少した。支持脚外側への移動や左右回転の角運動量は変化しなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

片脚回転動作におけるバランス制御の動力的解析は、転倒を防ぐための関節運動の制御において具体的にどのようなトルク発揮が有効であるかを明らかにすることができる。身体重心の速度における関節運動の貢献の三次元解析、またシミュレーションのための三次元で機能する粘弾性ばねモデルの作成は転倒予防研究におけるブレイクスルーとなる。動力的解析手法で構築される下肢モデルの開発手法を確立すれば、片脚支持回転動作、片脚立ちジャンプ、歩行時の方向転換における片脚支持期の動作解析などに応用することができ、回転動作だけでなく他の類似動作のシミュレーション研究にも応用できる。

研究成果の概要(英文)：When turning in ballet around a vertical axis, translations of the center of gravity and the angular momenta of front-back and left-right rotations must be adjusted to avoid falling over. This study aimed to investigate the kinetic contribution to the angular momentum and translations to clarify how to adjust the balance during turning. After determining joint torques with the inverse dynamics calculation for up to quadruple pirouette by dancers, contributions of joint torques, motion-dependent terms, and gravity terms to the horizontal shift of the center of gravity and angular momentum around the center of pressure in the supporting foot were determined using the equations of motion of the whole body. As the number of rotations increased, the forward shift of the center of gravity decreased and the angular momentum of the front-back rotation during turning decreased. The outward shift towards the supporting leg and the angular momentum of left-right rotation did not change.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：動的バランス 動力的解析 角運動量 重心移動

1. 研究開始当初の背景

クラシックバレエにおける片脚支持回転動作は、腕を回しながら爪先立ちを行うため動的な状態でバランス調整を必要とする(図1)。申請者はこれまで片脚支持回転動作の体肢の協調運動について研究してきた。片脚支持回転動作では回転力を得るために上体を大きく回転させる。上体の回旋で回転の勢いを獲得した後、床と足との摩擦を減らして回転しやすくするために片脚爪先立ちとなる。この時上体の角運動量生成に応じて下肢筋トルク発揮は調整される。



図1:回転中の片脚支持爪先立ち

体肢が大きく動く時のバランス(動的バランス)調整では、歩行で身体重心(CoM)と足圧中心(COP)の移動や CoM の速度に対する下腿三頭筋の貢献が報告されている(Hof & Otten, 2005)。しかし回転動作におけるバランス調整のメカニズムは研究されていない。動的バランスの調整では、体肢の運動を協調させて転倒のモーメントが相殺されていると考えられるが、その動力学的機構は不明である。

2. 研究の目的

本研究の当初の目的は上体と下肢がダイナミックに動く状態での片脚支持爪先立ち動作及びその保持、片脚支持回転動作を題材に、バランス保持戦略の選択とその制御について調べることであった。動力学的解析では、片脚爪先立ち姿勢で回転するモデル作成が必要である。まず計測データを使用してダンサーの回転動作のモデル化を行う。次に計測データを模擬することでモデルの妥当性を検証する。作成されたモデルを用いてコンピュータシミュレーションを行い、重心の初期運動量に応じた転倒のモーメント制御について考察する。しかし動力学的解析のためのモデル作成において、モデルの身体特性係数(BSP)誤差により片脚支持爪先立ち時の運動方程式の誤差項が大きくなりすぎることが分かった。そこで本研究期間では、まず誤差項を許容したうえで、全身の動力学的解析手法を確立することを目的とした。さらに、当初の研究目的の一つであったモデル作成において、外力入力装置として想定していた足底に設置する粘弾性バネの位置の同定を目的とした。

3. 研究の方法

【実験方法】

プロクラシックバレエダンサー(40名程度)によるピルエット(片脚支持での多回転動作、その場での片脚支持爪先立ち及びその保持動作)をモーションキャプチャーシステムと足圧分布計測計で計測する。1度の片脚爪先立ち動作で1回転から4回転までを行うピルエット順に行う。成功した最高回転数ごとにダンサーのレベルを分ける。

【解析】

・IAA: Koike et al. (2017)の手法を用いて逆動力学法を利用した解析(式1)を行う。これまで申請者が行ってきた逆動力学法による解析手法に加え、関節の拘束式などを用いて各セグメントのCoMの一般化加速度を求める運動方程式を解く。これを積分し全身のCoM速度や前後左右軸周りの角運動量に貢献する筋トルクや運動依存トルクの発生源について各関節運動を明らかにする。

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^{42} A_{T\alpha} T_{\alpha,i} + \bar{A}_V V + A_G G + A_{err}$$

セグメント重心加速度・角加速度
各関節トルク項
運動依存項
重力項
モデル化誤差項

式1:セグメントの一般化加速度同定式

・足圧分布解析: インソール型の足圧分布計測機では足底に作用した鉛直方向の力が測定できる。支持脚となる足の前足部に貼付したマーカー(第一および五足趾の付け根、第二足趾のつま先)から、足を前足部(爪先から土踏まずまで)と後足部(土踏まずから踵まで)にわけ、それぞれの部位に作用した鉛直方向の力の作用点の重心と力の比率を求める。力の作用点の重心は、足のマーカーから構築した座標系内で爪先からのベクトルとして足の長さを用いて標準化する。

4. 研究成果

片脚支持回転動作中の全身重心移動に貢献する関節運動

両脚支持期終了時は前脚側に1cm、体幹前側に2-4cm移動した(図2)。これらの移動はほぼトルク項と重力項で構成されていた。左右方向は後脚の膝関節伸展トルクによる右への移動を前脚の膝伸展トルクが抑えていた。前後方向は重力による体幹の右側への移動を、前脚の足底屈トルクや空中の膝関節屈曲トルクによる体幹の後側への移動で抑えていた。上肢の貢献はほとんど見られません。左右移動に関して4回転から3回転までとは体肢の貢献の傾向が変わり、各体肢の関節トルクによる移動距離では体幹の貢献が大きくなった(図3)。

体肢の角運動量生成は体幹のトルクの角運動量生成が打ち消していた(図4・5)。後脚の股関節屈伸トルクによる体幹の角運動量生成が大きく、同脚の膝屈伸トルクや前脚の足底屈トルクがその逆回転方向の角運動量を生成していた(図4)。体幹の角運動量は体幹回旋トルクによる

角運動量生成方向及び全身の重心移動方向と一致していた(図4)。これらのことから、体肢の角運動量生成への貢献は下肢や体幹トルクによる角運動量生成で打ち消され、体幹回旋トルクが勢いを与えた軸回りに体幹が回転し、全身重心の移動方向が決まることが推測された。

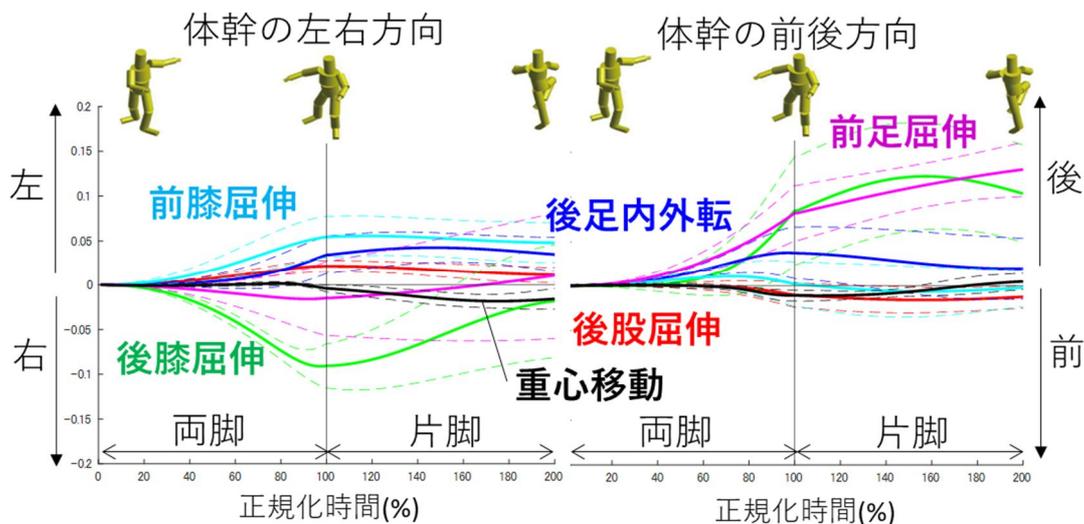


図2: 身体重心の移動に貢献する下肢関節トルク

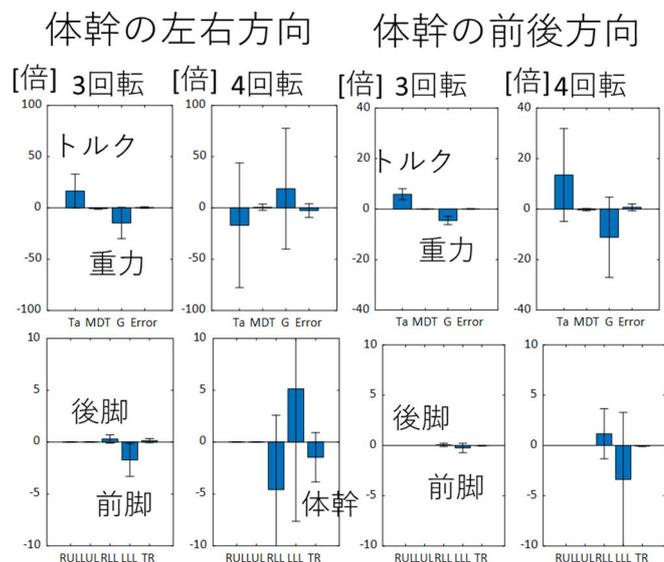


図3: 各体肢の力学による身体重心移動への貢献(3・4回転ピルエットの比較)

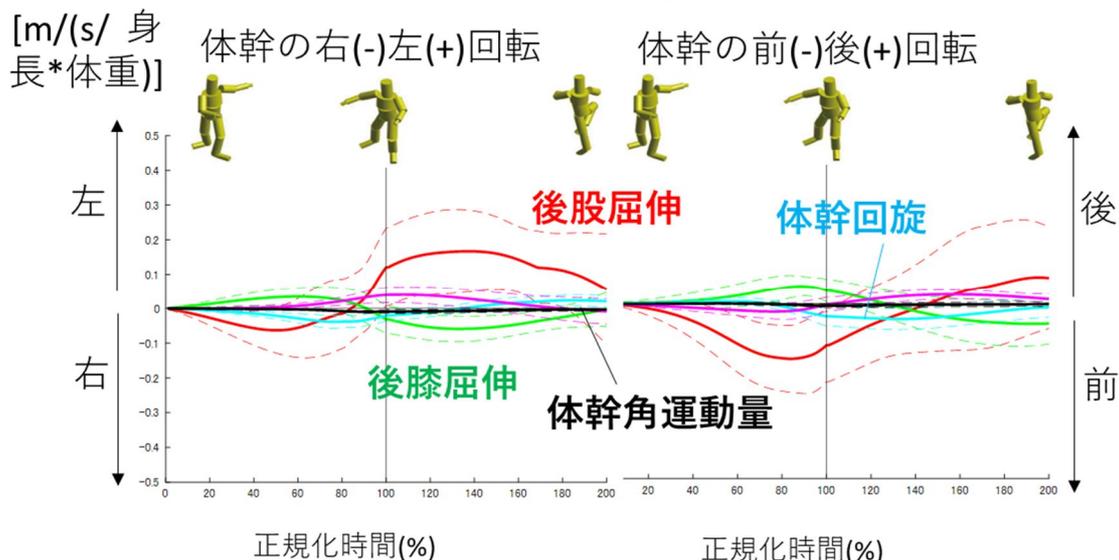


図4: 前後左右方向の角運動量に貢献する下肢関節トルク

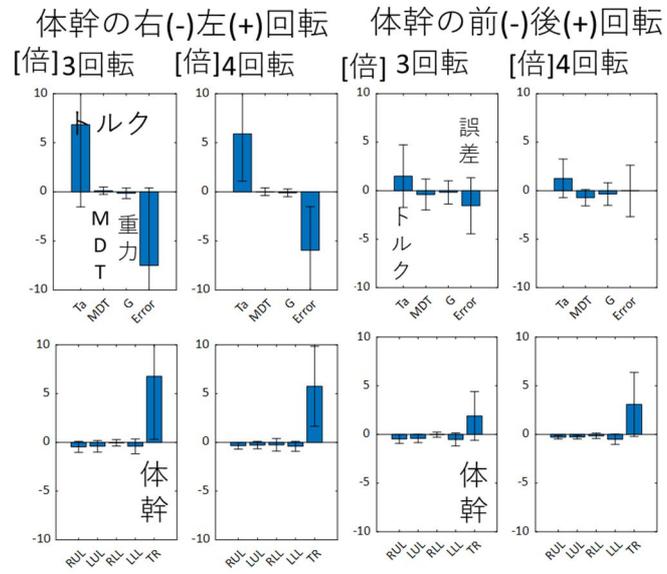


図 5:各体肢の力学による前後左右方向の角運動量への貢献 (3・4 回転ピルエットの比較)

想定される粘弾性バネの位置

回転開始時の両脚支持期では、前足部および後足部における荷重中心点は爪先(第二足趾先端)から踵骨突起に貼付したマーカーを結ぶ軸のライン上に約2 cm、12 cm移動した位置に見られた。前足部および後足部に作用した鉛直方向の力の比率は、5:1であった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Akiko Imura; Yoichi Iino; Sekiya Koike	4. 巻 April 5
2. 論文標題 Dancers utilize a 'whip-like effect' to increase arm angular momentum during multiple-revolution pirouette en dehors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sports Biomechanics	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/14763141.2022.2056074	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 井村祥子, 飯野要一, 小池関也
2. 発表標題 片脚支持回転動作（ピルエット）の連続回転における上肢と体幹部の角運動量調整メカニズム
3. 学会等名 第25回日本バイオメカニクス学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井村祥子, 飯野要一, 小池関也
2. 発表標題 バレエの片脚支持回転動作における上体角運動量生成メカニズム ~ 全身の関節トルクが鉛直軸周りの身体角運動量の生成に及ぼす影響 ~
3. 学会等名 日本体育学会 第70回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井村祥子, 飯野要一, 小池関也
2. 発表標題 片脚支持回転動作（ピルエット）における上肢の角運動量生成メカニズム ~ 上肢運動の技術差の観点から ~
3. 学会等名 日本バイオメカニクス学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akiko Imura, Hiroyuki Nagaki, Takuya Goto and Takahiro Higuchi
2. 発表標題 MOTION OF CENTRE OF PRESSURE DURING STANDING ON TIPTOE ON ONE LEG - ASSOCIATION WITH FOREFOOT SHAPE OF CLASSIC BALLET DANCERS
3. 学会等名 36th International Conference on Biomechanics in Sports 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関