

C-1-1

ボールルームダンスにおけるヒールターンの解析

Mechanical Analysis of Heel Turn in Ballroom Dancing

○正 塩谷 義^{*1}

Tadashi SHIOYA^{*1}

^{*1} 東京大学 The University of Tokyo

The Heel turn is a figure which represents the characteristic feature of international style ballroom dancing. The heel turn is mechanically analysed in the present study. The natural turn and the reverse turn in Foxtrot are taken as the representative example of the heel turn. The natural movement of dancers' motion is represented in the analysis by assuming the continuity of the curvature of moving path and the velocity of dancers. The movement of each dancer as well as that of the couple centre, and the rotation of the couple, rise and fall, the sway are obtained by the analysis of these figures. The difference between the natural turn and the reverse turn is discussed to explain the actual feeling difference of dancers.

Key Words : Foxtrot, Couple Dancing, Rotation, Inside and Outside Turn, Swing, Mechanics of Smooth Movement

1. 緒 言

一般的にダンスにおいて回転運動は重要な動きであり、各種の回転運動は、多くのダンスで共通の動きもみられる。回転動作のなかで Heel Turn は、特にボールルームダンスにおいて特徴的な simple で美しい動作のひとつである。Heel Turn は回転の中心が内側回転側の Dancer の Heel で行なわれる動作であり、代表的な Heel Turn は Foxtrot における Natural Turn および Reverse Turn の前半の女子の動作にみられる。ISTD の Syllabus (ISTD, 1944) によれば Heel Turn は、

A turn that is first commenced on the ball of the stepping foot and then continued on the heel, the closing foot being kept parallel throughout. The weight is transferred on to the foot that has closed as the turn is completed.

となっている。すなわち、Heel Turn は後退歩の Heel で行なわれる回転ではあるが、Heel での回転に先立ち、まず Ball での回転から始まること示されている。これは、回転中心は Heel ではあるが、回転のはじめに回転中心に向かう体重移動が行われていることを示唆している。なお、Heel Turn は Heel での回転後の 1 歩を含む計 3 歩で構成されると解釈されている。Heel Turn を含む Figure は Modern Ballroom Dancing の Swing Dance 各種目にあり、広い意味の Heel Turn (Heel Pull, Heel Pivot を含む) を種目別に列挙すると、基本 Figure では、

Waltz: Closed Impetus, Open Impetus, Double Reverse Spin, Closed Telemark, Open Telemark, Hesitation Change (Heel Pull)
Foxtrot: Natural Turn, Reverse Turn, Closed Impetus, Open Impetus, Natural Weave, Closed Telemark, Open Telemark,

Hover Cross, Reverse Wave, Natural Twist Turn, Natural Hover Telemark

Quickstep: Natural Turn (Heel Pull), Closed Impetus, Open Impetus, Double Reverse Spin, Running Right Turn, Heel Pivot が示されている (ISTD, 1944)。Heel Turn の回転中心は内側回転者の Heel 付近なので回転半径は最短時には Contact Hold している男女の重心間距離程度となる。Heel Turn とよく比較される Pivot Turn も、通常の Natural Turn, Reverse Turn に比べては回転半径が短い、Heel Turn と比べては長い。Heel Turn では内側回転者は回転の中心区間では水平移動はほとんどなく、外側回転者には Couple 間距離程度の若干の回転移動がある。並進運動 T と回転運動 R の組み合わせで Pivot と Heel Turn とを比較考察すると、Pivot ははじめから回転運動、Heel Turn においてははじめに並進運動、つぎに回転運動、最後に並進運動と解釈できる。なお、Pivot は 1 動作 (1 歩) であり (塩谷, 2019)、Heel Turn は上述のように 3 動作 (3 歩) の組み合わせである。

本研究は、Heel Turn の動作を美しく踊るためにこの回転動作を力学的に合理的な Model で表現することを目的とする。まず、Natural Movement として Model 構築の方針を示す。次に具体的な代表例として Foxtrot の Natural Turn (右回転) および、Reverse Turn (左回転) の動作の Model 解析を示す。Natural Turn と Reverse Turn の Heel Turn 部分 (前半 3 歩) は、Syllabus の記述では単に左右を置き換えたものであるが、実際、かなり感覚が異なる。そして、左回転の Heel Turn がよく用いられているのに対し、右回転の Heel Turn は Professional の競技会や Demonstration においてさえ、少なくなっている。右回転 Heel Turn が左回転の Heel Turn に比べてより高度の技術を要するからと思われる。本研究において、力学的観点からこの点も明らかにする。

2. 解 析

2・1 力学解析の方針、および、左右回転の共通項

Heel Turn の過程を代表的な左右の回転である Foxtrot の Natural Turn および Reverse Turn の前半を例にとり段階 (Stage) に分け力学的に分析する。

第 1 段階：Couple 重心がほぼ直線運動で回転中心方向へ向かう Swing を行なっている。初速および初期回転速度がある。回転は前動作から始まっているが、回転中心はまだ固定点ではない。

第 2 段階：男女重心を結ぶ線が回転中心 (Heel 着地点) に向く回転中心固定の回転、ただし、回転半径は固定ではない。(回転半径が短縮する運動を伴う。)

第 3 段階：回転中心固定、回転半径固定の回転、すなわち、内側者 Heel 中心の剛体回転の Model で記述される。

第 4 段階：内側回転の Dancer は直線前進、外側回転の Dancer は回転終了動作を伴いながらを後退する。

Swing Dance における Rise and Fall は、力学的エネルギーと密接に関係している (塩谷, 2016)。Foxtrot の Heel Turn については、回転外側者 (男子) は 1 歩目 (Slow, 2 拍, 以下 S と略す)、Down の状態から Rise の動作、2 歩目 (Quick, 1 拍, 以下 Q と略す)、3 歩目 (Q) と Up の状態を維持し、3 歩目の後半で Lower。回転内側者 (女子) は 1 歩目後半にわずかに Rise (No Foot Rise)、2 歩目で Rise 継続、3 歩目で Up を維持してから後半 Lower と記述されている。(ISTD, 1944)。ただし、男子が回転内側の場合 (Impetus Turn など) の場合は若干上記と異なる。上記の各段階は、およそ各歩の進行が目安であるが、具体的な着地時や重心の載る時に正確に対応するというよりも、重心移動の解析のため Stage を分けたものである。

本解析においては、主に Couple (重心) の運動を力学的に記述する。条件として、Syllabus (ISTD, 1944) に規定された方向 (Alignment)、回転量 (Amount of turn)、Timing などの項目を忠実に守るとともに、重心径路の運動を力学的に合理的に表現する必要がある。すなわち、運動を関数で表現する際に、まず、刻々の時点において、位置、速度、角度、角速度の関数は連続でなければならない。また、加速度、角加速度に (不連続に近い) 急激な変化が生ずる場合、例えば上記各段階間の接続点では、その時点で Floor と接した足を通じて外力に変化があるとみなす。具体的な各段階の関数形としては、力の変化が少ない場合は次数の低い多項式 (線形式など)、また、ある程度自由運動に近いとみなせる場合は三角関数が適切と考える。Dancer の運動を低次の Fourier series で表現するという考え方である。任意の運動を表現するには、より高次の関数も可能ではあるが、その場合は、自然の運動というよりは、装飾的 (Cosmetic または Decorative) な運動と解釈できる。

Foxtrot の Natural Turn, Reverse Turn を他の Swing Dance、具体的には Waltz などと比べてみる。Waltz の Natural Turn, Reverse Turn の場合は、One Swing の間、重心の移動はほぼ直線に近いが、Foxtrot の場合径路にかなり大きな曲率を伴う。(短半径の回転)。径路の曲率は、回転中心方向の外力を必要とする。片足に体重が載っている場合は、重心の傾斜 (左右の Sway または前後の傾斜) を必要とする (塩谷, 2017, SHIOYA, 2018b)。径路の曲率に不連続な部分があるときは、速度がほとんどゼロに近いが、または、両足接地で、両足の間で曲率変化に対応した力を必要とする。Heel Turn の終了時付近で内側 (女子) の Dancer が Heel 回転 (重心速度なし) を終了している間、外側 (男子) の Dancer は両足間で方向変更の力を要する。それ以外の部分の重心径路においては、曲率の不連続は避けるべきである。(曲率の変化は身体傾斜の揺れを生じるため)。したがって、適切な重心移動径路を採るには、曲率変化が連続である関数を繋ぐのがよい。

内側の Dancer（女子）の Heel を中心に回転する区間（上記の第 2 段階，第 3 段階）を Dancer の動作から考察してみると，第 2 段階は主として女子の Ball 上で回転しながら中心への距離を縮める区間，第 3 段階は，半径固定で女子の Heel 付近を軸に回転する区間とみなせる．第 4 段階では内側 Dancer は回転無しで直線前進，外側 Dancer のみ少し回転となる．

次に，速度条件を検討する．Foxtrot の場合は，Natural Turn や Reverse Turn の Figure に入るとき（1 歩目），初速があり，3 歩目の終わりでも速度（終速）がある．すなわち Natural Turn の先行（Preceding Figure）は一般に Three Step であり，Reverse Turn の先行は一般に，Feather Type（Feather Step, Feather Finish, Feather Ending, Weave Ending）の Figure であるので，初速がある．また Heel Turn の動作を終了して LOD に進行する時点では両足が前後に開いて速度を持っている．回転速度に関しては，初期回転速度は設定可能であるが，終端の第 4 段階ではいったん回転が終了した時点までとする．

Heel Turn 時の回転中心に関しては，上記第 2 段階，第 3 段階では固定であるが，前後の第 1 段階，第 4 段階では移動がある．なお回転中心の定義は，男女重心を結ぶ線が時間変化に対して交わる点とする（塩谷，2019）．座標は Heel Turn 時の回転中心を原点とし，LOD 方向を x 軸，中央（Centre）方向を y 軸とする．男女とも重心位置を代表座標とする．Hold は男女の重心を結ぶ線が Facing Direction から β だけずれているとする（図 1）．Heel Turn 時には女子体重は Heel 上（原点）とみなす．重心回りの回転角を女子重心 θ ，男子重心 $\theta + \pi$ で表す． θ は身体の向きではなく，Couple 重心と女子重心を結ぶ線の LOD からの傾斜で定義する．もし，男子が LOD に向き，女子が左右のずれなく（正対），LOD に背面するとすれば， $\theta = 0$ となるが，実際は β のずれがある．今回の解析においては， $\beta = \pi/4$ とする．なお，座標 (x, y) を極座標で表わしたときの角度は本報では Θ で表わす．また，Dance の進行方向は ISTD の Syllabus の標準の Alignment に従い，Natural Turn では，男子 LOD 向きに前進で始め，前半の終わり（3 歩目）は LOD に後退（前半の回転量 1/2），Reverse Turn には中央斜め（Diagonally to Centre）前進で開始，前半終わりは LOD 後退（前半の回転量 3/8）とする．

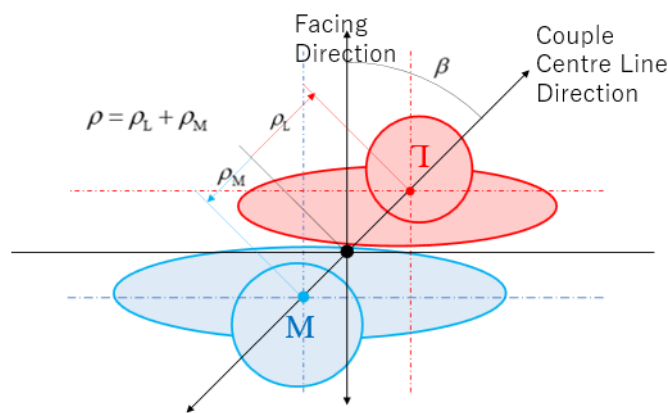


Fig.1. Ballroom Dance Hold. Man and Lady. Deviation angle β from facing direction

解析結果としては，上記の方針に基づいた Natural Movement で得られる Couple 重心 (x_G, y_G) ，男子重心 (x_M, y_M) ，女子重心 (x_L, y_L) の推移，および，回転中心 (x_C, y_C) の推移で表わす．男女間の重心位置の距離を ρ ，それぞれ重心の Couple 重心からの距離を ρ_M ， ρ_L とする．Couple 重心からの男女の距離の比は体重の比に反比例する．女子，男子の重心位置はそれぞれ，

$$\begin{aligned}
 \text{Lady} \quad x_L &= x_G + \rho_L \cos \theta & y_L &= y_G + \rho_L \sin \theta \\
 \text{Man} \quad x_M &= x_G - \rho_M \cos \theta & y_M &= y_G - \rho_M \sin \theta
 \end{aligned} \tag{1}$$

以下の Natural Turn および Reverse Turn の解析における数値例としては、 $\rho = \rho_L + \rho_M = 0.25 \text{ m}$ ，体重比

L:M=45:55 として、 $\rho_L = 0.1375 \text{ m}$ ， $\rho_M = 0.1125 \text{ m}$ とする。

Dancer の動きに関し、移動速度や径路の曲率変化の解析のため径路に沿った移動距離 l を定義する。移動距離の原点は第 3 段階の終了時とする。Couple 移動距離: l_G ，女子移動距離: l_L ，男子移動距離: l_M ，Couple の移動速度: $\frac{dl_G}{dt} = v_G$ 。回転速度 $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ とする。時間 t の原点も第 3 段階の終了時とする。すなわち at $t=0$ ，

$l_G = l_L = l_M = 0$ で、Start 点 t_s においては $t_s < 0$ ， $l_G < 0$ ， $l_L < 0$ ， $l_M < 0$ とする。Foxtrot は 4/4 拍子で標準 Tempo は 28–30 bars/min (bpm) である。開始点 t_s は、-5/8bar の時刻、Count では S+(1/2)Q，また、終了点 t_E は、

3/8bar，Count では (1/2)Q+Q，とみなす。すなわち、女子の 2 歩目、足を揃える Count Q の後半で前進の推進を

始めると考えると $t_s = -\left(\frac{5}{8}\right)\frac{60}{bpm}$ ， $t_E = \left(\frac{3}{8}\right)\frac{60}{bpm}$ となる。以下の数値解析においては、28 bpm とし

て、 $t_s = -\frac{60}{28} \times \frac{5}{8} = -1.339 \text{ s}$ ， $t_E = \frac{60}{28} \times \frac{3}{8} = 0.8036 \text{ s}$ を与える。径路の傾斜角を ψ とする。 $\frac{dy}{dx} = \tan \psi$ 径路

の曲率は $\kappa = \frac{d\psi}{dl}$ で与えられる。

Foxtrot は Waltz，Quickstep などとともに Swing Dance であり、Natural Turn，Reverse Turn においても、振り子のような加減速の Swing を行なう。Heel Turn においては、第 3 段階終了時までをひとつの Swing，第 4 段階は次の Swing の始まりとみなす。Swing の過程は調和関数（三角関数）で記述する（塩谷，2016，SHIOYA，2018a）。径路に沿った加減速 $\frac{d^2 l_G}{dt^2} = \alpha_G$ ，および、径路に沿った速度 $\frac{dl_G}{dt} = v_G$ と径路の曲率 κ に対応した遠心加速度が慣性力として Dancer にかかる。径路の方向と Dancer の向きは角度 β のずれがあるので、体側方向成分は

$$\alpha_{\text{side}} = \alpha_G \sin(\psi - \theta - \beta) + \kappa_G v_G^2 \cos(\psi - \theta - \beta) \quad (2)$$

であり、片足に体重があるときは Inclination Sway（塩谷，2017，SHIOYA，2018b）に対応する。

2・2 Natural Turn の解析

ここでは右回りの Heel Turn の代表 Figure である Foxtrot の Natural Turn の前半（3 歩）の解析を示す。女子の Step は、1 歩目：左足後退，2 歩目：右足を左足にそろえる（Heel Turn），3 歩目：左足前進，と記されている。右回りの回転であるので重心回りの角度 θ は回転に伴い、減少することになる。

第 1 段階 (S→A→T→B)

Foxtrot の Natural Turn は Syllabus 上では LOD 向きから始めることになっているので（Facing LOD），LOD 向きとなった時点 A 時点とする（ $\theta_A = 0 - \beta = -\pi/4$ ）。しかし先行 Figure の Three Step の最後の歩（男子右足）

においては Right Side Leading であり Natural Turn の一歩目（Three Step の最後の歩）において、男子の身体が面する方向は LOD（足先の向き）より若干左向きであるので A より前のその時点 Start 点 S 時点とする

$(-\pi/4 < \theta = \theta_s < 0)$ 。Couple 重心は Start 点 S から、A を通り LOD に平行な直線運動をする（ $y_G = y_{GB}$ ，

constant）。Couple 重心の直線運動の終点を B 時点とする（ $x_G = x_{GB}$ ）。径路傾斜 $\psi_{GS} = \psi_{GA} = \psi_{GB} = 0$ 。Start 時

点の位置 S は Heel Turn 中心（原点）からの径路長さ位置 $l_G = l_{GS}$ で与える（Swing の距離）。 S 点の初期角度

$\theta = \theta_S$, 初期速度 v_{GS} , 初期角速度 ω_S を与える。A 点 ($x_G = x_{GA}$, $t = t_A$) の位置, 時刻は, 角度 θ_S ,

$\theta_A = -\pi/4$, θ_B および, この間の $\theta(t)$ (後述) から計算する。

Foxtrot の Natural Turn では, はじめに少し左に予備回転を入れるのが自然の動きである。Couple の重心回りの回転が左から右に移行する時点を T 時点とする。すなわち, 回転中心は $S \rightarrow T$ 間は男子の後方, $T \rightarrow B$ 間は女子の後方, T 点で回転中心は男子後方の無限遠方から女子後方の無限遠方に変わる。B 点に近づくにつれ回転中心は原点に近づき, B 時点で回転中心は原点となる。S \rightarrow B 間の回転中心の具体的な方法を示す。この間の男女重心を結ぶ線の式は

$$y = (\tan \theta)(x - x_G) + y_{GB} \quad (3)$$

であり, 微小進行後の男女の中心を結ぶ線との交点として回転中心

$$x_C = x_G + \left(\frac{dx_G}{d\theta} \right) \sin \theta \cos \theta \quad y_C = y_{GB} + \left(\frac{dx_G}{d\theta} \right) \sin^2 \theta \quad (4)$$

が求まる。B 点以降 $\rightarrow C \rightarrow D$ 点までは回転中心は原点である。

第 1 段階での Couple 重心径路傾斜, および, 径路の曲率は 0 である。

第 2 段階 (B \rightarrow C)

Couple 重心は B (x_{GB}, y_{GB}) から径路の曲率を少しずつ増し C 点 (x_{GC}, y_{GC}) まで移動する。曲率は B 点で

は $\kappa_{GB} = 0$, C 点では $\kappa_{GC} = -1/\rho_L$ であり, この間 (B \rightarrow C) の曲率は径路に沿って線形変化, すなわち

$$\kappa_G = \left(\frac{l_G - l_{GB}}{l_{GC} - l_{GB}} \right) \kappa_{GC} = - \left(\frac{l_G - l_{GB}}{l_{GC} - l_{GB}} \right) \frac{1}{\rho_L} = \frac{d\psi_G}{dl_G} \quad (5)$$

とする。回転中心は B 点以降 $\rightarrow C \rightarrow D$ 点まで原点である。B \rightarrow D 間 $\theta = \Theta$ である。

第 3 段階 (C \rightarrow D)

C 点から Couple 重心は半径固定 (ρ_L) の円弧を描き, y 軸上 D 点 ($\rho_L, 0$) まで移動する。ここでは代表例と

して, C \rightarrow D 間回転量を右へ $1/8$, すなわち $\pi/4$ と与える ($\theta_C = -(3/4)\pi$, $\psi_{GC} = \theta_C + \pi/2 = -\pi/4$) .

$$\theta_C > \theta > -\pi \quad \psi = \theta + \pi/2 \quad \kappa_G = 1/\rho_L$$

男子重心は半径 ρ の円弧, 女子重心は回転中心（原点）に固定である。先に記した ISTD の Heel Turn の記述に対応して解釈すると, B \rightarrow C 間は女子左足 Ball 上回転 (女子の重心はわずかに後方へ移動), C \rightarrow D 間は Heel

上回転とみなせる。D 点は解析の基準点であり, $t_D = 0$, $l_G = l_L = l_M = 0$, $\theta_D = -\pi$, $\psi_{GD} = -\pi/2$.

第 4 段階 (D \rightarrow E)

D 点では女子は回転を終了して重心は右足に移っている。D \rightarrow E 間は, 女子は左足で x 軸上に直線的に前進す

る。男子は, A \rightarrow D 点までの回転量は右に $3/8$ ($-(3/4)\pi$) , さらに D \rightarrow E 間で残りの回転が右 $1/8$ ($-\pi/4$)

である。この区間は, 女子の進行径路が直線であるのに対し, 男子の進行径路は若干左側 (壁側) に膨らむこととなる。D 点の径路接続の条件は女子は速度 0 であるので女子の径路傾斜は不連続を可とするが, Couple 重心線および男子重心線は, 若干速度成分があるので径路および径路の傾斜も連続と考える。第 3 段階の終わり

傾斜は $-\pi/2$ (Wall 方向) であるので, 第 4 段階でもこれを引き継ぐ. ただし, 径路の曲率に関しては, D 点で連続である必要はないと考える. 力学的には, D 時点で外力 (Floor を通じての) が働く解釈できる. E 点は回転が終了し, 径路は LOD 方向に Smooth に移行する時点とする. 径路の形状は Wall 方向から LOD 方向に直角に変化する. 具体的には, 後述の径路に沿った Swing の関数 $l_G(t)$ およびこの区間の角速度の Swing の

関数 $\theta(t)$ から求まる. すなわち, y_G は $y_G = \rho_L \sin \theta$ により決まり, 径路傾斜 ψ は $\frac{dy_G}{dx_G} = \tan \psi \cdot x_G$ の位

置は $\frac{dx_G}{dt} = \left(\frac{dl_G}{dt}\right) \cos \psi$ により与えられる. (男女の回転量には途中若干差異が生じるが, 本解析における角

度 は男女の重心を結ぶ線の角度で定義しているのもので唯一である.) $\theta_E = -(5/4)\pi$, $\psi_{GE} = 0$, $y_{LE} = 0$,

$y_{GE} = \rho_L / \sqrt{2}$, E 点の傾斜, 曲率はともに 0, 位置は, 移動距離 l_{GE} に与えられるものとする.

D→E 間の回転中心の具体的な求め方は, この間の男女重心を結ぶ線の式 $y = (x - x_G) \tan \theta - \rho_L \sin \theta$ と, 微小進行後の式を連立させることにより得られ, 下式となる.

$$x_C = x_G + \left(\frac{dx_G}{d\theta}\right) \sin \theta \cos \theta + \rho_L \cos^3 \theta \quad y_C = \left(\frac{dx_G}{d\theta}\right) \sin^2 \theta - \rho_L \sin^3 \theta \quad (6)$$

重心の径路の形状とともに Heel Turn における Swing を解析するため, 径路に沿った時間変化について考察する. 開始・終了時の条件は, Foxtrot の場合は, Waltz の Natural Turn の場合と異なり, Start の開始 S 点においても終了 E 点においてもある程度の速度があると考え. Heel 上での Heel Turn CD 間では女子は速度 0 で回転のみ, 男子はこの間, 原点まわりの回転で D 点においてもわずかな速度成分が残っていると考える. A 点, B 点, C 点, D 点は速度連続 B 点, C 点では曲率も連続, Start 点 S から D 点まで ($t_s \leq t \leq 0$) をひとつの Swing とみなし, Couple 重心運動は単純な調和関数で表わせるものとする. すなわち, 径路に沿った移動距離を時間に対し多項式+三角関数で示す. 条件としては S 点 ($t = t_s$) と D 点 ($t = 0$) の Couple 重心の位置

($l_{GS}, 0$) と速度 (v_{GS}, v_{GD}) 加速度 (α_{GS}, α_{GD}) で与える. 具体的な関数形としては

$$\begin{aligned} l_G = & \left\{ l_{GS} - \frac{1}{6}(\alpha_{GS} + 2\alpha_{GD})t_s^2 \right\} \left\{ \left(\frac{t}{t_s}\right) + \frac{1}{2}\alpha_{GD}t_s^2 \left(\frac{t}{t_s}\right)^2 + \frac{1}{6}(\alpha_{GS} - \alpha_{GD})t_s^2 \left(\frac{t}{t_s}\right)^3 \right. \\ & - \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2}(v_{GS} - v_{GD})t_s - \frac{1}{4}(\alpha_{GS} + \alpha_{GD})t_s^2 \right\} \sin \left(\frac{\pi t}{t_s} \right) \\ & \left. - \frac{1}{2\pi} \left\{ l_{GS} - \frac{1}{2}(v_{GS} + v_{GD})t_s - \frac{1}{12}(\alpha_{GS} - \alpha_{GD})t_s^2 \right\} \sin \left(\frac{2\pi t}{t_s} \right) \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

上式は, 加速度を, 開始時加速度 α_{GS} , および, 終了時加速度 α_{GD} を線形配分したものを基本とし, さらに, 三

角関数でそこからの変動分を表したものである. ここで, $\alpha_{GS} = 0$, $\alpha_{GD} = 0$ とみなし, 簡単化する. さらに,

無次元長さ l_G' および無次元時間 t' を導入し整理すると, 上式は

$$l_G' = t' - \frac{1}{2\pi} (v_1' - v_0') \sin(\pi t') - \frac{1}{2\pi} \left\{ 1 - \frac{1}{2} (v_1' + v_0') \right\} \sin(2\pi t') \quad (8)$$

と表記できる．上式中の無次元パラメータは，ここでは， $t' = -t/t_s < 0$ ， $l_G' = -l_G/l_{GS} < 0$ ，

$v_1' = v_{GS}(t_s/l_{GS}) > 0$ ， $v_0' = v_{GD}(t_s/l_{GS}) > 0$ である．

D→E 間 ($0 \leq t \leq t_E$) に関しては次の Swing につながる部分と考える．終了時点 E での位置，速度を l_{GE} ， v_{GE} ，加速度を 0 とし，関数形としては，上の(8)式を用いる．ただし，無次元 Parameter はこの区間では

$t' = t/t_E > 0$ $l_G' = l_G/l_{GE} > 0$ $v_1' = v_{GE}(t_E/l_{GE}) > 0$ $v_0' = v_{GD}(t_E/l_{GE}) > 0$ とする．

次に回転角度 θ の時間変化 (Swing) について考察する．S→D 区間の後半 B→D 部分では回転中心固定なので径路 l_G の Swing が決まれば角度 θ も角速度 ω も自動的に決まる．S→D 区間の前半 S→B 区間では S 点および B 時点での θ および ω の条件のもと，角度 θ に関しても， l_G と同様の三角関数形を用いる．すなわち，

$$\theta' = t' - \frac{1}{2\pi} (\omega_1' - \omega_0') \sin(\pi t') - \frac{1}{2\pi} \left\{ 1 - \frac{1}{2} (\omega_1' + \omega_0') \right\} \sin(2\pi t') \quad (9)$$

と表わす．ここで，無次元 Parameter は $t' = -(t-t_B)/(t_s-t_B) < 0$ ， $\theta' = -(\theta-\theta_B)/(\theta_s-\theta_B) < 0$ ，

$\omega' = \omega(t_s-t_B)/(\theta_s-\theta_B)$ ， $\omega_1' = \omega_s'$ ， $\omega_0' = \omega_B'$ である．

この式により A 点 ($\theta_A = -\pi/4$) の時刻 t_A が決まり，さらに，時刻 t_A から l_{GA} ， x_{GA} ， y_{GA} が決まる．

区間 D→E の角度に関しては回転中心固定区間がないので，この区間全域に関し角度 θ の時間関数も，径路 l_G と同じ関数式(9)を用いる．ただし，この区間 D→E では(9)式中の無次元 Parameter は， $t' = t/t_E > 0$ ，

$\theta' = (\theta-\theta_D)/(\theta_E-\theta_D)$ ， $\omega' = \omega t_E/(\theta_E-\theta_D)$ ， $\omega_0' = \omega_D'$ ， $\omega_1' = \omega_E'$ である．この区間の始めの D 点の初期角速度は前の C→D 間からの連続性により

$$\omega_D = \frac{v_{GD}}{\rho_L}，\quad \omega_0' = \frac{t_E}{(\theta_E-\theta_D)} \omega_D = \frac{v_{GD} t_E}{(\theta_E-\theta_D) \rho_L} = \frac{l_{GE}}{(\theta_E-\theta_D) \rho_L} v_0' \quad \text{である．}$$

全体の Dancer の運動が決まると，径路に沿った速度 v_G ，加速度 α_G ，径路の曲率 κ_G により，Inclination Sway に対応する Dancer の体側方向成分の加速度(2)式が求められる．

以下に具体的な数値解析例を示す．開始時 $t = t_s < 0$ において，Couple 重心の位置 $l_{GS} = -1.3\text{m}$ ，

$$v_{GS} = 1.3\text{m/s}，\quad \alpha_{GS} = 0，\quad \theta_s = -\pi/8，\quad \omega_s = \frac{1}{2} \left(\frac{\theta_B - \theta_s}{t_B - t_s} \right) = -0.33814\text{s}^{-1}，\quad t = 0 \text{ において } l_{GD} = 0，$$

$v_{GD} = 0.1 \text{ m/s}$, $\alpha_{GD} = 0$, 終了時点 $t = t_E > 0$ において, $l_{GE} = 0.5 \text{ m}$, $v_{GE} = 1.0 \text{ m/s}$, $\alpha_{GE} = 0$

$\theta_S = -(5/4)\pi$, $\omega_E = 0$ とする.

図2に Natural Turn 前半における Couple 重心の動き, および男子, 女子それぞれの重心の動きの解析例を示す. また, このときの回転中心の動きを図3に示す. S→D 間における絶対値最大曲率は C→D 間の半径一定区間であり, $\kappa_G = -1/\rho_L = -7.273 \text{ m}^{-1}$ となる.

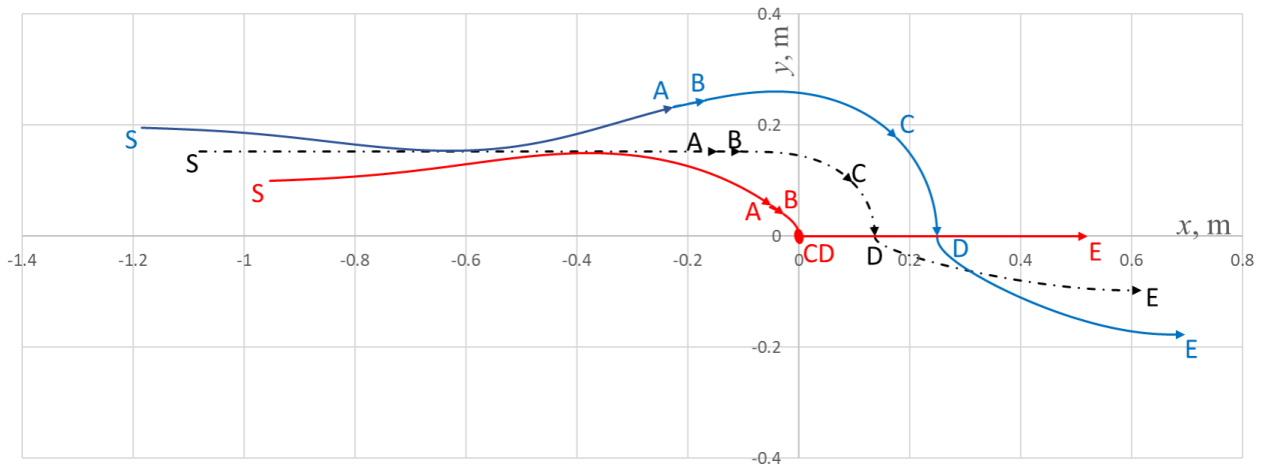


Fig.2. Dancers' Movement in Heel Turn to Right (Former Part of Foxtrot Natural Turn)
Dashed line: Path of couple's gravity centre. Red line: Path of Lady. Blue line: Path of Man.

図3は, 径路距離 l_G , 速度 v_G , 加速度 a_G を時間 t に対して表したものである.

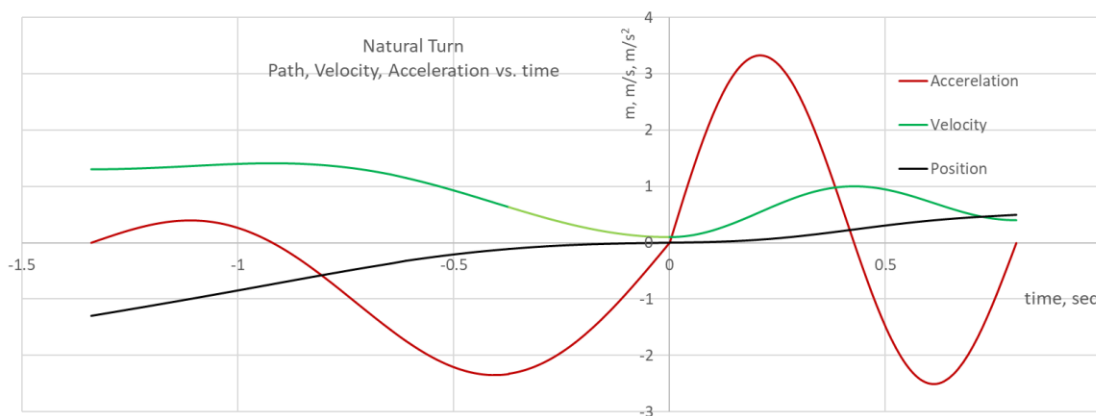


Fig.3. —: Traveling Distance of Dancers' Centre of Gravity, —: Its Velocity, —: Its Acceleration
in Former Part of Foxtrot Natural Turn.

図4は, Sway に対応する体側方向の加速度を径路沿いの加減速効果と遠心力効果に分け示したものである. Heel Turn 区間で両者が相乗していることがわかる.

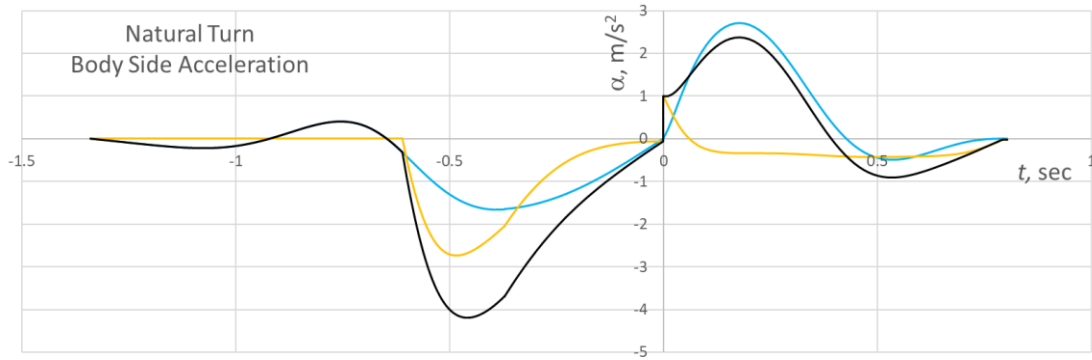


Fig.4. Body Side Acceleration in Former Part of Foxtrot Natural Turn

—: Effect of Translational Movement, —: Effect of Rotational Movement, —: Total Acceleration

2・3 Reverse Turn の解析

左回りの Heel Turn の代表 Figure である Foxtrot の Reverse Turn の前半 (3 歩) を解析する。女子の Step は、1 歩目：右足後退，2 歩目：左足を右足にそろえる (Heel Turn)，3 歩目：右足前進，と記されている。左回りの回転であるので重心回りの角度 θ は回転に伴い，増加することになる。

第 1 段階 (S→A→B)

Foxtrot の Reverse Turn は Syllabus 上では中央斜め向きから始めることになっているので (Facing Diagonally to Centre)，中央斜め向きの時点を A 点とする ($\theta_A = 0$)。しかし先行する Feather Type の Figure (Feather Step,

Feather Finish, Feather Ending, Weave Ending) の Penultimate Step (最後から 2 番目の Step) では CBMP となっているので，Reverse Turn の第 1 歩 (先行する Figure の最終歩) では進行方向 (中央斜め) に対し身体の左側 (男子) が先行する形 (足先の向きに対し身体は若干右向き) から始まるのでその時点を Start 点 S 時点とする

($\theta_S < 0$)。Start 時点の位置 S は Heel Turn 中心 (原点) からの径路長さ位置 $l_G = l_{GS}$ で与える (Swing の距離)。

S 点の初期角度 $\theta = \theta_S$ ，初期速度 v_{GS} ，初期角速度 ω_S を与える。Couple 重心は Start 点 S から，A を通り中央

斜めに平行な直線運動をする ($y_G = x_G < 0$ ， $dy_G = dx_G = dl_G / \sqrt{2}$)。Reverse Turn の場合は，Swing の途中で回

転の内側，外側の男女の関係が入れ替わる。すなわち男子の軌跡と女子の軌跡が交差する (女子が先行して交差)。この事象は Waltz の場合でも見られたが (塩谷，2018)，男女の Hold の位置関係に起因するものである。

この男女の内外交差時点を Couple 重心の直線運動の終点とみなし B 時点とする。B 時点においては男子－女子

－原点は一直線上となる。($\theta_B = \pi/4$ ， $x_{MB} = y_{MB} = x_{GB} - \rho_M / \sqrt{2} < 0$ ， $x_{LB} = y_{LB} = x_{GB} + \rho_L / \sqrt{2} < 0$)

S→B 間の回転中心は男子の後方であるが，B 時点に近づくと無限遠方となり，B 時点以降では回転中心は原点となる。A 点，B 点の時刻は，後述の Swing 関数により決まる。

第 2 段階 (B→C)

B→C 間は Couple 重心が原点への距離を縮めながら原点を中心として回転する Heel Turn の中核区間である。

Couple 重心は B (x_{GB}, y_{GB}) から C 点 (x_{GC}, y_{GC}) まで移動する。

$\theta_C = \pi/2$ ， $x_{LC} = y_{LC} = x_{MC} = x_{GC} = l_{GC} = 0$ ， $y_{MC} = -\rho$ ， $y_{GC} = -\rho_L$ 。

B→C 間の Couple 重心運動径路は B 点 C 点の条件を満たす滑らかな 2 次の調和関数で表わす。

$$y_G = -\rho_L + \left(1 + \frac{\rho_L}{x_{GB}}\right) x_G - \frac{x_{GB}}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi x_G}{x_{GB}}\right) - \left(\frac{x_{GB}}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{2} + \frac{\rho_L}{x_{GB}}\right) \sin\left(\frac{2\pi x_G}{x_{GB}}\right) \quad (10)$$

第3段階 (C→D)

原点回りに半径固定で回転する Stage であるが、通常の Reverse Turn においては、Natural Turn に比べて全体の回転量が少ないことと、男女の Hold 角との関係により、半径固定の Stage は必要でなく、直接第4段階に進む。

すなわち C 点=D 点である。この時点を実原点とする。 $t_C = t_D = 0$

第4段階 (D→E)

D 点では女子は回転を終了して重心は左足に移っている。D→E 間は、女子は右足で x 軸上に直線的に前進する。男子は、A→D 点までの回転量は左 1/4 ($\pi/2$)、さらに D→E 間で残りの回転が左 1/8 ($\pi/4$) である。この区間は、女子の進行径路が直線であるのに対し、男子の進行径路は若干右側（中央側）に膨らむこととなる。D 点の径路接続の条件は Natural Turn の場合と同様、Couple 重心線は、径路および径路の傾斜も連続と考える。第3段階の終わりで傾斜は $\pi/2$ (Centre 方向) であるので、第4段階でもこれを引き継ぐ。ただし、径路の曲率に関しては、D 点で連続である必要はないと考える。力学的には、D 時点で外力 (Floor を通じて

の) が働くとして解釈できる。E 点は回転が終了した点とする。 $\theta_E = (3/4)\pi$, $y_{LE} = 0$, $y_{GE} = -\rho_L / \sqrt{2}$,

傾斜、曲率はともに 0 とする。

回転中心の具体的な求め方は、Natural Turn の場合と同様である。Reverse Turn における Swing も Natural Turn の場合と同様 S→D 区間と D→E 区間に分けて考える。径路の時間関数としては(8)式を用いる。無次元パラメータも同様とする。角度の時間関数についても、B→D 間は回転中心固定であるから、重心径路が決まれば自動的に決まり、S→B 区間、D→E 区間については(9)式を用いる。同式において S→B 区間では

$$t' = -\frac{t-t_B}{t_S-t_B} < 0, \quad \theta' = -\frac{\theta-\theta_B}{\theta_S-\theta_B} < 0, \quad \omega' = \frac{d\theta'}{dt'} = \frac{t_S-t_B}{\theta_S-\theta_B} \omega, \quad \omega_1' = \frac{t_S-t_B}{\theta_S-\theta_B} \omega_S, \quad \omega_0' = \frac{t_S-t_B}{\theta_S-\theta_B} \omega_B$$

また D→E 区間においては、 $t' = t/t_E > 0$, $\theta' = (\theta-\theta_D)/(\theta_E-\theta_D)$, $\omega' = \omega t_E / (\theta_E-\theta_D)$, $\omega_0' = \omega_D$, $\omega_1' = \omega_E$ とする。

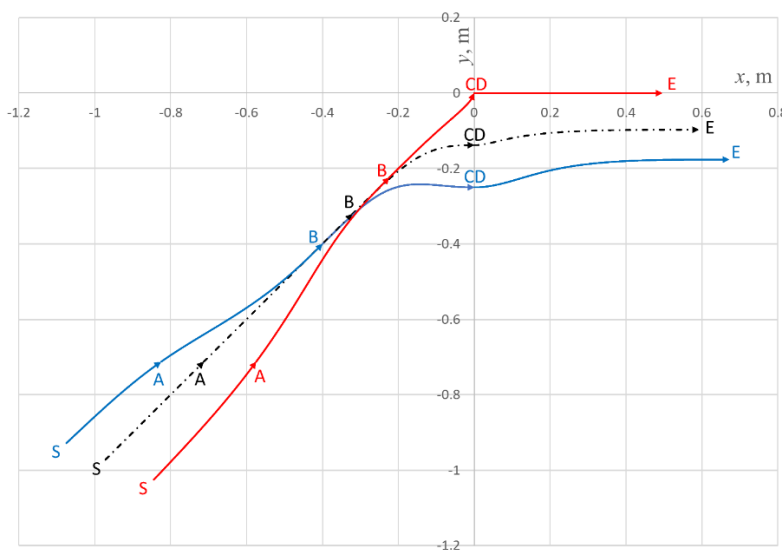


Fig.5. Dancers' Movement in Heel Turn to Right (Former Part of Foxtrot Reverse Turn)
Dashed line: Path of couple's gravity centre. Red line: Path of Lady. Blue line: Path of Man.

図 6 は、径路距離 l_G ，速度 v_G ，加速度 α_G を時間 t に対して表したものである。

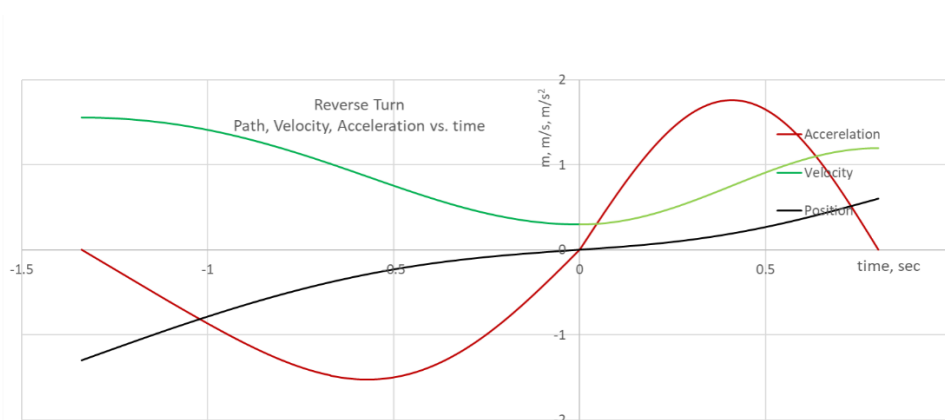


Fig.6. —: Traveling Distance of Dancers' Centre of Gravity, —: Its Velocity, —: Its Acceleration in Former Part of Foxtrot Reverse Turn.

図 7 は、Sway に対応する体側方向の加速度を径路沿いの加減速効果と遠心力効果に分け示したものである。Heel Turn 区間において遠心力項は加減速効果を減じる方向に働くことがわかる。

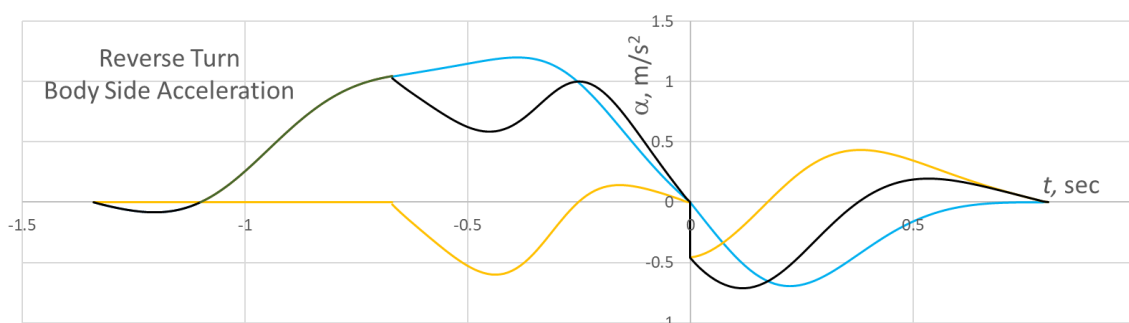


Fig.7. Body Side Acceleration in Former Part of Foxtrot Reverse Turn
—: Effect of Translational Movement, —: Effect of Rotational Movement, —: Total Acceleration

3. 考 察

Foxtrot の Natural Turn と Reverse Turn の Heel Turn は、記述上は単に左右を入れ替えたものであるが、実際の動きはかなり大きく異なることがわかる。本報においては、初速、歩幅等の条件の数値は一例のみを示したが、数式が与えられているので実際に個々の Dancer の条件による変化は容易に得られる。

Natural Turn と Reverse Turn の径路 Pattern は、図 2，図 5 に見られるように大きく異なる。Reverse Turn が Heel Turn の回転中心が固定する以前に男女の入れ替わりがあるのに対し、Natural Turn においては、Heel Turn 終了後となっている。Reverse Turn の場合は、男子 1 歩目から 2 歩目へほぼ直線的に Swing を行なうのに対し、Natural Turn は Reverse Turn に比べて径路の変化（曲率）が大きい。すなわち Natural Turn の場合は Swing の途中でかなり Curve して回り込むので、第 3 段階の踊り方を難しくしている。比喩的な表現をすると、サッカーの試合で Corner Kick で直接 Goal を狙うように Ball の軌道を Control する技術のようとも言える。別の説明としては、Heel Turn の中心区間において回転中心は女子 Heel 付近であるが、Natural Turn においてはその区間内でも、回転半径一定の区間が存在するのに対し、Reverse Turn においては回転半径が伸縮する区間のみである。Natural Turn における半径一定の回転区間は、男女重心および回転中心は剛体的であるが、Dancers は円弧径路を維持するた

め体側方向の Sway, 前後の傾斜, フロア-靴間の摩擦力 (塩谷, 2020) を Control する必要がある. この難しさのためか, 多くの競技会や Demonstration においても Natural Turn 前半は Curved Feather に置き換え, また, Natural Weave, Hover Cross などでも, P. P. (Promenade Position) から始めることにより Heel Turn を避ける傾向が広くみられる.

体側方向の加速度は Inclination Sway に対応するが, 径路に沿った加減速項と遠心力による項に分けて分析できる. Heel Turn に向かう減速時においては, Natural Turn では両項は同符号となり強調されるのに対し, Reverse Turn においては逆符号となり, Sway を減じることができる. Heel Turn の Exit 部では両者とも逆符号であるが, Sway 形状を維持するための Bending Sway に移行する.

Heel Turn 中心区間後に LOD に進行する部分にも回転は僅かにある. Natural Turn の場合は男子内側回転, 女子外側回転であるが, Reverse Turn の場合は男子外側回転, 女子内側回転となる. これは回転中心が Natural Turn の場合, 男子の後方, Reverse Turn の場合, 女子後方にあることから示されている.

(男子の) Heel Turn を含む Impetus Turn は Pivot を含む Natural Spin Turn としばしば比較される. Impetus は右回りの男子の Heel Turn であり, Natural Turn の女子の Heel Turn との共通点もある. しかし, Impetus Turn の女子の 2 歩目は Left foot to side であるのに対し, Natural Spin Turn においては対応する女子の 5 歩目が Left foot back and slightly to side であり, 回転中心も内側回転者の足位置 (男子左足) から若干離れていて, また Sway も生じない (塩谷, 2019). Impetus においては女子は男子の Heel が回転中心であることを意識して横に回り込むことが大切となる.

4. 結 語

ボールルームダンスにおける Heel Turn の力学的解析を行なった. Natural Movement を表現する Model 構築により, Dancer の運動を力学的に表現した. 右回りの回転と左回りの回転の相違についても解析により明らかにした. Dancer は Model の理解により, より自然で美しい Heel Turn の動きを目標とすることができる.

文 献

- (1) ISTD (The Imperial Society of Teachers of Dancing), "The ballroom technique", 1st edition (1944), 10th edition (1982), pp. 1-134.
- (2) SHIOYA, T., "Analysis of Swing Movement in Ballroom Dancing", The International Sports Engineering Association Conference, ISEA 2018, Brisbane, Australia, 26 to 29 March 2018, MDPI-Proceedings Volume 2, ISEA 2018a, 2 (6), 224.
- (3) SHIOYA, T., "Analysis of Sway in Ballroom Dancing", The International Sports Engineering Association Conference, ISEA 2018, Brisbane, Brisbane, Australia, 26 to 29 March 2018, MDPI-Proceedings Volume 2, ISEA 2018b, 2 (6), 223
- (4) 塩谷義, "ボールルームダンスにおける身体の上下運動の解析", 日本機械学会講演論文集 SHD No.16-40 (2016), C9.
- (5) 塩谷義, "ボールルームダンスおよびその他のスポーツにおける身体のスウェイの解析", 日本機械学会講演論文集 SHD No.17-43 (2017), D1.
- (6) 塩谷義, "ボールルームダンスにおける左回転と右回転の比較の解析", 日本機械学会講演論文集 SHD No.18-15 (2018), C21.
- (7) 塩谷義, "ボールルームダンスにおけるピボットターンおよび関連動作の解析", 日本機械学会講演論文集 SHD No.19-306 (2019), C2.
- (8) 塩谷義, "ボールルームダンスにおける靴とフロアの摩擦モデル", 日本機械学会講演論文集, SHD No.20-15 (2020), C2-1.