Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00263

Received date : 12 August, 2021

Accepted date : 7 November, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 16 November, 2021

© The Japan Society of Mechanical Engineers

この記事はクリエイティブ・コモンズ [表示-非営利-改変禁止 4.0 国際]ライセンスの下に提供されています。
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>)

4つの緊張索の張力差を用いた競技用鉄棒器具の荷重条件の同定

大塚 賢哉^{*1}, 濁川 靖^{*2}, 青木 義男^{*3}, 荒川 直輝^{*4}

Load condition identification of a gymnastics horizontal bar apparatus using the tension balance of four cables

Kenya OHTSUKA^{*1}, Yasushi NIGORIKAWA^{*2}, Yoshio AOKI^{*3} and Naoki ARAKAWA^{*4}

^{*1,*4} Graduate School of Science and Technology, Nihon University
7-24-13 Narashinodai, Funabashi-shi, Chiba 274-8501, Japan

^{*2} Senoh Corporation

250 Matsuhidai, Matsudo-shi, Chiba 274-2214, Japan

^{*3} College of Science and Technology, Nihon University

7-24-13 Narashinodai, Funabashi-shi, Chiba 274-8501, Japan

Abstract

Gymnastics are diversifying skills and advanced with the development of the competition. Therefore, the guidance and scoring of gymnastics are also difficult. In recent years, various sports aimed at improving the performance of players from scientific perspectives are increasing. Even in the gymnastics competition, a player's skeleton is estimated from a number of points with three-dimensional coordinate data in measurement using Light Detection and Ranging (LiDAR), and the operation analysis of the player is conducted. They identify gymnastics skills as a scoring support system and serve to accuracy and fairness of scoring. However, they have not been evaluated how players deal with the apparatus. The grasping the size and direction of the force from the amount of deformation of the apparatus leads to the improvement of the skills. In addition, players are changing the gymnastic apparatus to their own preferences by adjusting the load of cables. From this, the load of cables is an important factor in load condition identification of the apparatus. In this research, we will use the load cell to measure the load of cables and consider whether the load of cables when the quasi-static load is applied is useful for load condition identification of the gymnastics horizontal bar apparatus.

Keywords : Gymnastics, Horizontal bar, Load cell, Sports analysis, Load condition identification, Cables

1. 緒 言

センシング技術やバイオメカニクス等のスポーツ工学の研究が進み、これらのスポーツ工学を活用することで選手のパフォーマンスの向上や競技の採点及び判定に用いる競技が増えている。選手のパフォーマンスの向上において従来では選手自身や指導者の経験や感覚で行われてきた練習や指導が数値化され、可視化されることで選手の練習への理解度や技術の向上に繋がりやすい練習メニューの組み立てを行うことができています。また、採点・判定の面では採点の正確性や試合の公平性の確立に貢献している。体操競技においても技が高速化・複雑化し、審判員が判定に戸惑うケースが増加しており、採点の正確性・公平性の確保が国際体操連盟での長年の課題となっている。近年では Light Detection and Ranging (LiDAR) 方式の 3D レーザセンサを用いた計測により 3 次元座標データを持つ多数の点から選手の骨格を推定し、選手の動作解析を行う(梶井他, 2020)ことで体操競技における採点の正確性・公平性の確保に貢献している。さらにこの技術を用いて指導者の指導の質や選手の理解度の向上、新しい技の開発に向けて各団体で取り組み始めている。しかし、骨格を推定するだけでは技の種類やその

No.21-00263 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00263]

^{*1} 正員, 日本大学大学院 理工学研究科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

^{*2} セノー (株) (〒274-2214 千葉県松戸市松飛台 250)

^{*3} 正員, 日本大学 理工学部

^{*4} 日本大学大学院 理工学研究科

E-mail of corresponding author: cskn19001@g.nihon-u.ac.jp

完成度について評価することができても、選手が競技中に受ける負荷や器具にかかる荷重から器具の構造特性や選手の器具の使い方の詳細についてまでは評価することが難しい。そこで、器具の運動計測を行い、その計測結果を用いて競技者の運動を把握することができれば、身体が受ける負荷や的確な器具の使い方についても評価できる可能性がある。

本報で対象とした鉄棒競技では器具を Federation International de Gymnastique (FIG) が定める FIG Apparatus Norms の規格で選手が競技の際に握るバーと支柱のジョイントの形状は3種類と認めている。加えて、緊張索も4つであれば規格を満たしており、国際大会に使われる主要な器具メーカーの中でも緊張索の張り方は2種類存在する。そのため、国際大会において環境面や精神面等の要因に加えて使用される器具が異なることで国内大会では良い演技ができていた選手が自分の思うような演技ができず、得点が伸びない傾向がある。これらの課題からも鉄棒競技では器具の運動計測を行い、身体が受ける負荷や器具の使い方について分析や評価を行うことで、技の向上と高得点化に繋がる可能性がある。

競技者の運動の把握と器具の変形が与える競技者への影響度合の把握を目的として、体操競技における鉄棒ではバーにひずみゲージを取り付け、バーのたわみ量からバーのしなりと競技者の動作の関係性について評価している(Klaus et al., 1996)。また、同様にひずみゲージを用いて鉄棒の技について動作解析を行っており、技に応じて鉄棒に加わる力に明確な違いがあることがわかっている(Kopp and Reid, 1980)。これらのことから器具の変形量を計測することで、競技者の運動解析に有用であることが示されている。しかし、バーにひずみゲージ等の検出器を用いると採点が伴う大会やその大会に向けた練習においても使用することが難しく、技の一つ一つは評価することができても、演技構成のすべてを評価することが難しい。そこで、本報では選手が競技前に緊張索の張力を個々に調整しているという点にも着目して、鉄棒器具の重要な構成要素である4つの緊張索の張力を用いた器具の構造特性に関する検討を行う。また、4つの緊張索張力の関係を用いた準静荷重試験の荷重条件の同定に有用であるかについても基礎的な検討を行う。

2. 競技用鉄棒の構成と競技中に器具が受ける荷重の評価

競技用鉄棒の主な構成要素は図1に示すように選手が競技の際に握るバー、支柱、バーと支柱のジョイント、支柱を支える緊張索の4つの部位から構成されている。

FIGの認定を受けて使用されている鉄棒器具の種類は図2に示すようなジョイントの違いで3種類、図3に示すような緊張索の張り方の違いで2種類存在する。これらの要素から大きく分けて4種類の鉄棒器具が日本人選手の出場する国内及び国際大会において使用されている。本報で対象とした鉄棒競技の器具は FIG Apparatus Norms の規格を満たし、FIGより認定を受けている Senoh 社製の競技用鉄棒である。Senoh 社製の競技用鉄棒はジョイントが図2 (b)、緊張索は図3 (b) となっている。

次に選手が演技をする際に受ける荷重は図4に示す荷重位置、変形量、荷重角度の3つで評価することができる。これらの要素は選手が器具の反動を利用した向心力を使って演技を行うため、これにより器具が受ける遠心力を示している。図4 (a) の荷重位置(負荷点) x は選手がバーを両手で掴んだ際の重心位置とバー中心位置との距離、図4 (b) の変形量 δ は荷重によるたわみ、図4 (c) 荷重角度 θ は力の向きを示す。本報ではこれらの3要素を準静荷重試験の試験条件とし、器具を支える4つの緊張索の張力の関係から構造特性を検討する。

Fig.1 Each part name of a gymnastics horizontal bar apparatus.

Fig.2 Types of the bar fixture specified in FIG apparatus norms. Type (a) is adopted by gymnova, spieth, janssen-fritsen and taishan sports. Type (b) is adopted by senoh. Type (c) is adopted by AAI.

Fig.3 Types of cable used in international competitions. Type (a) is adopted by gymnova and AAI. Type (b) is adopted by spieth, janssen-fritsen, taishan sports and senoh.

Fig.4 Three elements of load as conditions for quasi-static load test. (a) is the load position ($= x$). The load position is the distance between the center of gravity when the player grabs the bar with both hands and the center of the bar. (b) is the displacement ($= \delta$) of the bar due to the load. (c) is the angle ($= \theta$) of load.

3. 準静荷重試験

競技中の体操競技における鉄棒の器具は常に時間変化のある荷重を器具が受け続けるため、動荷重の試験が選手の競技中の測定を行う必要がある。しかし、荷重の変化による競技用鉄棒が持つ構造特性を詳細に知ることができていなければ、動荷重の条件においても何が要因であるか特定することは難しい。そこで、選手の競技中の器具の荷重条件の同定を最終目的として、本報では準静荷重の条件において4つの緊張索張力をロードセルにより測定し、その結果から初期緊張索張力や他の緊張索との関係を用いた荷重条件の同定手法が有用であるかを検討する。図5に器具を上面から見たときの荷重を受ける方向を正面とし、このときの各緊張索に取り付けたロードセルを正面から見て左前を L_f 、右前を R_f 、左後を L_r 、右後を R_r とした。

次に本報で用いた準静荷重試験の試験条件を表1に示す。本報で用いた Senoh 社製の競技用鉄棒は FIG Apparatus Norms の規格を満たした設置時に推奨される緊張索張力が約 2700[N]であるため、今回の試験においても準静荷重試験前の初期緊張索張力として 2700[N]とした。荷重位置は器具の正面からバーの中心を 0[mm]、中心から左に 200[mm]、400[mm]とした。また、変位量は様々選手の競技中の画像から各技の最大変位量が 50～60[mm]であったことから、目標変位量を 40[mm]、50[mm]、60[mm]とした。変位量は繰り返し精度 1[μm]のレーザ変位計を用いて計測を行った。最後に荷重角度は器具より高い位置で選手がバーから手を放して技を行うため、器具が大きな荷重を受けるのは重力方向の影響を受けやすい下方向である。そのため、本報では重力方向を 0[deg]とし、そこから 15[deg]ごとに水平方向の 90[deg]までの7種類とした。これらの各条件において3回ずつ試験を行い、その平均値を計測結果として用いる。準静荷重試験の角度固定装置を図6(a)に示す。荷重は図6(b)に示すように目標の変位量に 2.3[mm/s]で近づいていき、到達後 10[s]の間だけ静止し、再び 2.3[mm/s]で初期位置に戻る条件で行った。目標の変位量に到達後の 10[s]の間の 5[s]時点における計測値を準静荷重試験時の緊張索張力として、それぞれの初期緊張索張力や他の緊張索との関係から構造特性を検討する。また、本報における準静荷重試験の角度固定装置を用いた際の変位量の計測値の標準偏差は 1.04[mm]であり、緊張索張力の計測値の標準偏差は 22.6[N]である。

Fig.5 The direction of load and loadcell designation on gymnastics horizontal bar apparatus. Red circles are load cells. The red arrow is force direction. The force direction side is the front, loadcells are Lf (left-front), Rf (right-front), Lr (left-rear), Rr (right-rear).

Table1 Parameter of quasi-static load test. Since the tension cables tension recommended for installation of senoh's horizontal bar apparatus that meets the FIG apparatus norms is about 2700[N], this test also serves as the initial tension cables tension before the quasi-static load test.

Tension of cables [N]	2700
Position (x) [mm]	0,200,400
Displacement (δ) [mm]	40,50,60
Angle (θ) [deg]	0,15,30,45,60,75,90

Fig.6 Overview of quasi-static load test equipment. (a) is shown a side view of quasi-static load tester. The angle adjuster is for setting the load angle. (b) is target displacement diagram, the horizontal axis is time[s], the vertical axis is target displacement [mm]. The blue line has the target displacement of 60[mm], the orange line has the target displacement of 50 [mm], the green line has the target placement of 40 [mm]. The slope to the target displacement is 2.3 [mm/s]. After reaching it, it stopped for 10 [s] and returned to the initial position at 2.3 [mm/s].

4. 緊張索の張力を用いた構造特性の計測

荷重角度に対する4つの緊張索張力の測定結果を表したものを図7～9に示す。図7は変位量40[mm]、図8は変位量50[mm]、図9は変位量60[mm]のときの結果である。また、図7～9において(a)は荷重位置0[mm]、(b)は荷重位置200[mm]、(c)は荷重位置400[mm]である。

表2に示す荷重位置0[mm]、荷重角度0[deg]における各緊張索の試験前と試験後の張力の差分の結果より、変位量が大きくなるに従って4つの緊張索の張力は初期張力との差分が大きくなっていることがわかる。これより、荷重の大きさが器具から緊張索に影響を与えていることがわかる。また、図7～9より荷重位置と荷重角度に関係なく、変位量が大きくなることで初期張力との差分が大きくなっていることから同様のことが考えられる。次に荷重角度に応じた各緊張索の張力に注目すると、図7～9の(a)に示す荷重位置0[mm]より、緊張索の張力は前面に設置した緊張索 L_f , R_f と後面に設置した緊張索 L_r , R_r で0[deg]のときの張力を基準に角度が大きくなるにつれて前面は張力が小さくなり、後面は張力が大きくなることがわかる。また、表3は変位量40[mm]で荷重角度90[deg]における緊張索の左右の張力差を示したものであるが、荷重位置が中心から離れるに従って左右の張力差は大きくなることがわかる。加えて、緊張索の設置角度が水平面から約45[deg]で設置されていることから、4つの緊張索がそれぞれ荷重角度45[deg]付近から初期張力との差の変化量が少なくなっていることがわかる。

この他の図7より緊張索の張力が変位量の条件だけでなく、荷重角度に相関しており、荷重角度について考慮が必要である。加えて、図8, 9の変位量の条件を変えた場合も同様に左右の張力差が大きくなっているため、荷重位置の同定には変位量についての考慮も必要である。

Fig.7 Quasi-static load test results of four cables tension when the displacement(δ) is 40[mm]. The horizontal axis is the load angle and the vertical axis is the tension of the tension cable. The blue circle is load cell Lf, the orange circle is load cell Lr, the gray circle is load cell Rf, the yellow circle is load cell Rr. (a) is when the load position is 0[mm], (b) is when the load position is 200[mm], (c) is when the load position is 400[mm]. The tensions of the left and right tension cables are out of balance as the position moves away from the center(0[mm]) when the displacement is 40[mm].

Fig.8 Quasi-static load test results of four cables tension when the displacement(δ) is 50[mm]. The horizontal axis is the load angle and the vertical axis is the tension of the tension cable. The blue circle is load cell Lf, the orange circle is load cell Lr, the gray circle is load cell Rf, the yellow circle is load cell Rr. (a) is when the load position is 0[mm], (b) is when the load position is 200[mm], (c) is when the load position is 400[mm]. The tensions of the left and right tension cables are out of balance as the position moves away from the center(0[mm]) when the displacement is 50[mm].

Fig.9 Quasi-static load test results of four cables tension when the displacement(δ) is 60[mm]. The horizontal axis is the load angle and the vertical axis is the tension of the tension cable. The blue circle is load cell Lf, the orange circle is load cell Lr, the gray circle is load cell Rf, the yellow circle is load cell Rr. The tensions of the left and right tension cables are out of balance as the position moves away from the center(0[mm]) when the displacement is 60[mm].

Table2 Difference between tension before and after the test for each displacement when the load condition is load angle 0[deg] and load position 0[mm]. As the displacement increases, the difference between the initial tension and the tension after the test increases. Changes in load affect the apparatus and four tension cables.

Displacement [mm]	Difference between tension before and after the test [N] (Load conditions: Angle (θ) 0[deg], Position (x) 0[mm])			
	ΔL_f	ΔR_f	ΔL_r	ΔR_r
40	95	96	73	70
50	156	154	120	121
60	191	192	168	165

Table3 Difference between left and right tension for each position when the load condition is load angle 90[deg] and displacement 40[mm]. The difference in tension between the left and right increases as the load position moves away from the center.

Position [mm]	Difference between left and right tension [N] (Load conditions: Angle (θ) 90[deg], Displacement (δ) 40[mm])	
	$L_f - R_f$	$L_r - R_r$
0	-89	84
200	-194	216
400	-411	418

5. 荷重条件の同定手法の検討と精度

前章でも示した構造特性測定の際の変位量(δ), 荷重角度(θ), 荷重位置(x)の關係に注目して, 荷重条件の同定手法について検討を行う. そのため, 本報で提案する4つの緊張索の張力差を用いた器具の荷重条件の同定手法は変位量, 荷重角度, 荷重位置の順に導出を行う. まず, 4つの緊張索の張力の変化量の総和 ΔT_s を用いて荷重位置における変位量 δ の同定を行う. 4つの緊張索の張力の変化量の総和 ΔT_s は式(1)を用いて算出し, この結果を横軸に変位量, 縦軸に ΔT_s としたものを図10に示す. このときの試験条件は緊張索の初期張力を2700[N]としたのみで, 荷重角度と荷重位置を変化させたものも全て含む.

$$\Delta T_s = \Delta T_{Lf} + \Delta T_{Lr} + \Delta T_{Rf} + \Delta T_{Rr} \quad (1)$$

図10では荷重角度0~90[deg]の7種類, 荷重位置0~200[mm]の3種類を含む全ての条件から横軸にバーの変位量とし, 縦軸を4つの緊張索の張力の変化量の総和 ΔT_s を表したものである. また, 表4に示すように4つの緊張索の張力の変化量の総和 ΔT_s と変位量には相関があり, 荷重角度, 荷重位置との相関は小さい. 次に荷重角度 θ について式(2)に表す前後の緊張索の張力差 $\Delta T_{LR(r-f)}$ から同定を行う.

$$\Delta T_{LR(r-f)} = \frac{|T_{Lr} - T_{Lf}| + |T_{Rr} - T_{Rf}|}{2} \quad (2)$$

このとき, 図11に示す変位量40[mm]のときの荷重角度に対する前後の緊張索の張力差の關係より, 荷重位置の変化に従って, 左の前後の緊張索張力の差が高くなり, 右の前後の緊張索の張力差が低くなることがわかる. そのため, 左右の緊張索の張力差を前後で平均することで荷重位置との相関は小さくなる. また, 図11~13に示す荷重角度に対する前後の緊張索の張力差の關係より, 前述と同様に変位量が大きくなると左右それぞれの前後の緊張索の張力差の平均 $\Delta T_{LR(r-f)}$ も大きくなることがわかるため, 変位量を同定した後に荷重角度の同定を行う必要がある. そこで荷重位置 x について式(3)に表す緊張索の張力の左右差 $\Delta T_{rf(L-R)}$ から同定を行う.

$$\Delta T_{rf(L-R)} = \frac{|T_{Lf} - T_{Rf}| + |T_{Lr} - T_{Rr}|}{2} \quad (3)$$

図 14 は変位量 40[mm]，図 15 は変位量 50[mm]，図 16 は変位量 60[mm]の荷重角度ごとの荷重位置に対する緊張索の張力の左右差 $\Delta T_{rf(L-R)}$ を示す．図 14～16 より，緊張索の張力の左右差 $\Delta T_{rf(L-R)}$ は荷重位置に対して荷重角度ごとに異なる相関を示している．荷重角度の同定と同様に変位量の変化に応じて関数も変化していることから，荷重位置の同定には変位量，荷重角度の同定が必要であることがわかる．また，表 4 より ΔT_s は変位量で 0.75， $\Delta T_{LR(r-f)}$ は荷重角度で 0.89， $\Delta T_{rf(L-R)}$ は荷重位置で 0.74 と最も高い相関を示しており，次に相関が高いのが ΔT_s は荷重位置で 0.13， $\Delta T_{LR(r-f)}$ は変位量で 0.27， $\Delta T_{rf(L-R)}$ は荷重角度で 0.44 である．これら相関係数の値より，本報で用いた手法の緊張索の張力の関係式では変位量，荷重角度，荷重位置の順に導出することで器具の荷重条件の同定に応用できる可能性がある．

次に本報で提案した荷重条件の同定手法の精度について検討を行う．本報では 2 次式の回帰分析を用いて 4 つの緊張索の張力の変化量の総和 ΔT_s と変位量の関係式を算出した結果を図 17 に示す．また，各変位量における測定値の最大値と最小値を図 17 の図中に示し，回帰分析を用いて算出した式から同定可能な精度について検討する．変位量 40[mm]では-3[mm]から+5[mm]の 8[mm]の範囲の同定誤差に止まるが，変位量 60[mm]では-5[mm]から+8[mm]の 13[mm]の範囲の同定誤差となることから，荷重が大きくなることで誤差が大きくなってしまう．そのため，大きな荷重になるほど同定精度が低下する．しかし，選手が演技をする際には円運動に近い動作から荷重が加わるため，大きな荷重を受けにくい水平方向の荷重角度の大きさ等の大きな荷重を受ける前後の荷重から推定することもできるため，さらに精度を向上できる可能性がある．荷重角度の同定における精度は図 18 に示す変位量 60[mm]のときの荷重角度と前後の緊張索の張力差を測定値から回帰分析を行った結果より，荷重角度 15[deg]のときに-1[deg]から+2[deg]の 3[deg]の範囲の同定誤差に止まるが，荷重角度 75[deg]では-10[deg]から+15[deg]の 25[deg]の範囲の同定誤差となることから，水平方向（90[deg]）に近いほど荷重角度の同定の精度は低減していくことがわかる．これは，緊張索の角度が約 60[deg]で設置していることも関係していると考えられる．最後に変位量 60[mm]で荷重角度 15[deg]および 75[deg]のときの荷重位置と左右の緊張索の張力差を測定値から回帰分析を行った結果より，荷重位置の同定における精度は図 19 に示すように荷重位置 200[mm]では荷重角度 15[deg]よりも 75[deg]の方が同定誤差は小さくなっているが，荷重位置 400[mm]では荷重角度 15[deg]の方が同定誤差は小さくなっている．これは荷重角度の同定の際の傾向として挙げられた荷重角度が水平方向に近づくにつれて同定精度が低減していくことが影響していると考えられる．また，荷重角度 15[deg]および 75[deg]のどちらにおいても荷重位置が中心（0[mm]）に近いほど精度は高くなっている．ただし，本報で用いた Senoh 社製の競技用鉄棒のバーの全長が 2400[mm]であることを考慮すると，精度が最も低減している荷重角度 75[deg]の荷重位置 400[mm]においても同定誤差 34[mm]の範囲とバー全長の 2[%]未満の範囲で同定可能であるため，本手法を用いることで競技用鉄棒器具の荷重条件の同定に有用であると考えられる．

Table 4 Correlation coefficient with condition. ΔT_s and displacement, $\Delta T_{LR(r-f)}$ and angle, $\Delta T_{rf(L-R)}$ and position are correlated.

	ΔT_s	$\Delta T_{LR(r-f)}$	$\Delta T_{rf(L-R)}$
Displacement	0.75	0.27	0.14
Angle	-0.06	0.89	0.44
Position	0.13	0.03	0.74

Fig.10 Relationship between the sum of four cable tension and the displacement. The horizontal axis is the displacement, the vertical axis is the difference (ΔT_s) before and after the test of the sum of the tensions of the four tension cables. There is a first-order or second-order correlation between the difference ΔT_s before and after the test of the sum of the tensions of the four tension cables and the displacement. It seems that the correlation with the load angle and the load position is small.

Fig.11 Difference between rear and front cable tension when the displacement is 40[mm]. The horizontal axis is the load angle, the vertical axis is the difference in tension between rear and front (ΔT_{LR}). The blue circle is the tension cable tension on the left, the orange circle is the tension cable tension on the right, the gray circle is average of blue(Lr-Lf) and orange(Rr-Rf) circles. (a) is when the load position is 0[mm], (b) is when the load position is 200[mm], (c) is when the load position is 400[mm]. As the load position changes, the difference in tension between the front and rear tension cables on the left increases, and the difference in tension between the front and rear tension ropes on the right decreases. By averaging the tension of the left and right tension cables difference between rear and front, the correlation with the load position becomes smaller.

Fig.12 Difference between rear and front cable tension when the displacement is 50[mm]. The horizontal axis is the load angle, the vertical axis is the difference in tension between rear and front (ΔT_{LR}). The blue circle is the tension cable tension on the left, the orange circle is the tension cable tension on the right, the gray circle is average of blue(Lr-Lf) and orange(Rr-Rf) circles. (a) is when the load position is 0[mm], (b) is when the load position is 200[mm], (c) is when the load position is 400[mm]. As the load position changes, the difference in tension between the front and rear tension cables on the left increases, and the difference in tension between the front and rear tension ropes on the right decreases. By averaging the tension of the left and right tension cables difference between rear and front, the correlation with the load position becomes smaller.

Fig.13 Difference between rear and front cable tension when the displacement is 60[mm]. The horizontal axis is the load angle, the vertical axis is the difference in tension between rear and front (ΔT_{LR}). The blue circle is the tension cable tension on the left, the orange circle is the tension cable tension on the right, the gray circle is average of blue(Lr-Lf) and orange(Rr-Rf) circles. (a) is when the load position is 0[mm], (b) is when the load position is 200[mm], (c) is when the load position is 400[mm]. As the load position changes, the difference in tension between the front and rear tension cables on the left increases, and the difference in tension between the front and rear tension ropes on the right decreases. By averaging the tension of the left and right tension cables difference between rear and front, the correlation with the load position becomes smaller. The average of the tension difference between rear and front is increased as the displacement increases.

Fig.14 Difference between left and right cable tension when the displacement is 40[mm]. The horizontal axis is the load position, the vertical axis is the difference in tension between the left and right ($\Delta T_{rf(L-R)}$). The blue circle is when the load angle is 0[deg], the orange circle is 15[deg], the gray circle is 30[deg], the yellow circle is 45[deg], the light blue circle is 60[deg], the green circle is 75[deg], the purple circle is 90[deg]. The difference in tension between left and right shows a different correlation with respect to the load position for each load angle. Since the function changes according to the change in displacement as well as the identification of the load angle, it is necessary to identify the displacement and the load angle in order to identify the load position.

Fig.15 Difference between left and right cable tension when the displacement is 50[mm]. The horizontal axis is the load position, the vertical axis is the difference in tension between the left and right ($\Delta T_{rf(L-R)}$). The blue circle is when the load angle is 0[deg], the orange circle is 15[deg], the gray circle is 30[deg], the yellow circle is 45[deg], the light blue circle is 60[deg], the green circle is 75[deg], the purple circle is 90[deg]. The difference in tension between left and right shows a different correlation with respect to the load position for each load angle. Since the function changes according to the change in displacement as well as the identification of the load angle, it is necessary to identify the displacement and the load angle in order to identify the load position.

Fig.16 Difference between left and right cable tension when the displacement is 60[mm]. The horizontal axis is the load position, the vertical axis is the difference in tension between the left and right ($\Delta T_{rf(L-R)}$). The blue circle is when the load angle is 0[deg], the orange circle is 15[deg], the gray circle is 30[deg], the yellow circle is 45[deg], the light blue circle is 60[deg], the green circle is 75[deg], the purple circle is 90[deg]. The difference in tension between left and right shows a different correlation with respect to the load position for each load angle. Since the function changes according to the change in displacement as well as the identification of the load angle, it is necessary to identify the displacement and the load angle in order to identify the load position.

Fig.17 Accuracy of displacement identification method. The horizontal axis is the displacement, the vertical axis is the difference (ΔT_s) before and after the test of the sum of the tensions of the four tension cables. The blue line is ΔT_s , the blue circle is the maximum value of the test result, the blue triangle is the minimum value of the test result. It can be identified from -3 to +5[mm] when the displacement is 40[mm]. It can be identified from -5 to +8[mm] when the displacement is 60[mm]. The larger the load, the larger the identification error and the lower the identification accuracy.

Fig.18 Accuracy of load angle identification method. The horizontal axis is the load angle, the vertical axis is the difference in tension between rear and front (ΔT_{LR}). The green line is ΔT_{LR} , the green circle is the maximum value of the test result, the green triangle is the minimum value of the test result. It can be identified from -1 to +2[deg] when the load angle is 15[deg]. It can be identified from -13 to +15[deg] when the load angle is 60[deg]. When the load angle is 15[deg], the identification error is 3[deg], and when the load angle is 75[deg], the identification error is 25[deg]. Therefore, the accuracy of the load angle identification decreases when the load angle is close to the horizontal direction (load angle is 90[deg]). This is also related to the fact that the tension cable is installed at an angle of about 60[deg].

Fig.19 Accuracy of load position identification method. The horizontal axis is the load position, the vertical axis is the difference in tension between the left and right ($\Delta T_{rf(L-R)}$). The orange line is $\Delta T_{rf(L-R)}$ when the load angle is 15[deg], the orange circle is the maximum value of the test result when the load angle is 15[deg], the orange triangle is the minimum value of the test result when the load angle is 15[deg]. The blue line is $\Delta T_{rf(L-R)}$ when the load angle is 75[deg], the blue circle is the maximum value of the test result when the load angle is 75[deg], the blue triangle is the minimum value of the test result when the load angle is 75[deg]. At the load position 200[mm], the identification error is smaller at the load angle 15[deg] than at the load angle 75[deg]. But at the load position 400[mm], the identification error is smaller at the load angle 15[deg]. The identification accuracy decreases as the load angle approaches the horizontal direction. Since the total length of the bar is 2400[mm], it can be identified in the range of less than 2[%] of the total length.

6. 結 言

競技用鉄棒器具の荷重条件の同定手法として、準静荷重試験における4つの緊張索の張力差を用いたバーの変位量、器具が受ける荷重の角度および位置に関する同定手法を提案した。その結果以下に示す主要な結論を得た。

- (1) 4つの緊張索の張力の変化量の総和を用いることで、バーの荷重位置における変位量を-3~+5[mm]の範囲で同定可能であることを示した。
- (2) 前後の緊張索の張力差を用いることで、競技用鉄棒器具が受ける荷重の角度を-13~+15[deg]の範囲で同定可能であることを示した。
- (3) 左右の緊張索の張力差を用いることで、競技用鉄棒器具が受ける荷重の位置を-21~+13[mm]の範囲で同定可能であることを示した。
- (4) バーの変位量、荷重角度、荷重位置の順に同定することで、競技用鉄棒器具の荷重条件の同定に対して有用であることを示した。

4つの緊張索張力を用いることで、準静荷重の条件における器具の荷重条件の同定に有用である可能性を示した。これより、動荷重の条件においても同様な検討を行うことで競技用鉄棒器具の構造特性を把握した上で器具が受ける荷重から条件の同定が可能となり、競技中の選手の動作の解析にも期待できるものと考えられる。

謝 辞

本報を執筆するにあたり、セノー株式会社の石毛裕之様、角谷慈樹様、渡辺信幸様、田中慎一様、小林創様にご指導を賜り助言を頂きました。ここに厚く御礼を申し上げ、感謝の意を表します。

文 献

- Arakawa, N., Ohtsuka, K. and Aoki, Y., Investigation of the athlete's motion using the gymnastics apparatus' motion, Proceedings, International sports engineering association 2020, Vol.49, No.1 (2020), Paper No.120.
- 荒川直輝, 大塚賢哉, 青木義男, 加速度センサを搭載した体側器具による選手の運動同定手法の検討, Dynamics and Design Conference(2020), Paper No.428.
- Klaus, K., Volker, D. and Juergen, K., Dynamometric measuring procedures for horizontal bar and uneven bars, 14 International Symposium on Biomechanics in Sports (1996), pp.177-180.
- Kopp, P.M. and Reid, J.G., A force and torque analysis of giant swings on the horizontal bar, Canadian journal of applied sport sciences, Vol.5, No.2 (1980), pp.98-102.

- 梶井昇一, 手塚耕一, 矢吹彰彦, 佐々木和雄, 3D センシング・技認識による体操採点支援, 電子情報通信学会誌, Vol. 103, No. 1 (2020), pp.5-14.
- Shin, J. and Ozawa, S., A study on motion analysis of an artistic gymnastics by using dynamic image processing – for a development of automatic scoring system of horizontal bar -, IEEE international conference on systems, man and cybernetics (2008), Paper No.10560350.
- 呉明児, 小松宏年, 佐々木睦朗, ケーブルにより補剛されたアーチに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文誌, Vol.69, No.584 (2004), pp.87-94.
- 山下龍一郎, 平行棒における＜後方かかえ込み宙返り下り＞の修正指導に関する発生運動学的研究, スポーツ運動学研究, Vol.27(2014), p.1-18.

References

- Arakawa, N., Ohtsuka, K. and Aoki, Y., Investigation of the athlete's motion using the gymnastics apparatus' motion, Proceedings, International sports engineering association 2020, Vol.49, No.1 (2020), Paper No.120.
- Arakawa, N., Ohtsuka, K. and Aoki, Y., Study of athlete's motion identification method using gymnastics apparatus with an accelerometer, Dynamics and Design Conference(2020), Paper No.428 (in Japanese).
- Klaus, K., Volker, D. and Juergen, K., Dynamometric measuring procedures for horizontal bar and uneven bars, 14 International Symposium on Biomechanics in Sports (1996), pp.177-180.
- Kopp, P.M. and Reid, J.G., A force and torque analysis of giant swings on the horizontal bar, Canadian journal of applied sport sciences, Vol.5, No.2 (1980), pp.98-102.
- Masui, S., Tezuka, K., Yabuki, A. and Sasaki, K., A judging support system for gymnastics using 3D sensing and element recognition, The Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol. 103, No. 1 (2020) , pp.5-14 (in Japanese).
- Shin, J. and Ozawa, S., A study on motion analysis of an artistic gymnastics by using dynamic image processing – for a development of automatic scoring system of horizontal bar -, IEEE international conference on systems, man and cybernetics(2008), Paper No.10560350.
- Wu, M., Komatsu, H. and Sasaki, M., Experimental studies on an arch stiffened by cables, The Architectural Institute of Japan's Journal of Structural and Construction Engineering, Vol.69, No.584 (2004), pp.87-94 (in Japanese).
- Yamashita, R., Eine betrachtung über die methode der bewegungskorrektur des “salto rückwärts i.d. außenquerstand” am barren vom standpunkt der phänomenologisch-morphologischen bewegungslehre des sports aus, Japan Society of Sport Movement and Behaviour, Vol.27(2014), pp.1-18(in Japanese).