

競走馬調教軽労化のための騎手用筋力補助装置の開発

北海道大学 田中孝之
(共同研究者) 阿波屋庄兵衛 齊藤宗信
リース 鈴木善人
モリタホールディングス 坂本直久

Support Device for Horse Trainer to Decrease Muscular Fatigue on Horse Training

by

Takayuki Tanaka
Hokkaido University
Munenobu Saito
Awaya-shoubei Co. Ltd.
Yoshihito Suzuki
Leaps Co. Ltd.
Naohisa Sakamoto
Morita Holdings Corp.

ABSTRACT

We developed a soft power assist device named "Smart Suit" for reducing horse trainers' physical fatigue in their horse training works in order to prevent their spine or legs injuries. The smart suit is a kind of semi-active and flexible power assist devices. The semi-active assist mechanism consisting of rubber belt and small DC motor is our original technology and it is in patent pending. The assist force is basically gained by the elastic force of rubber belt, and it is controlled by tuning the length of the rubber belt by using DC motor. In order to gain the suitable assist force for periodical horse trainers' motion, the assist force control

method based on the periodical input control was developed in this study. Also, for stabilizing their horse riding motion, we developed the assist force control method considering their dynamic stability by controlling their center of gravity on the zero moment point (ZMP) which is the dynamic stable point. Experimental results showed that the smart suit installing these control method was effective to reduce the activities of muscles in the thigh. The assist ratio evaluated by EMG was 40-50%. Moreover, a prototype of Smart Suit Light of which the assist force is manually controllable was also developed. The smart suit light was also effective for horse trainers. In actual horse training, the assist ratio of back muscle, quadriceps femoris and hamstrings were 15%, 58% and 10% respectively.

要 旨

調教騎手の腰椎，脚部の傷病を防止することを目指して，競走馬調教時に調教騎手の腰，膝の負担を軽減する筋力補助装置スマートスーツおよびその制御法を開発した。スマートスーツは，弾性材が発する弾性力を補助力として用い，かつ弾性材の伸長量を小型モータで制御することで適切な補助力を得るセミアクティブアシスト方式の柔軟な増力装置である。騎手の周期的な動作に適した補助力を与えるために，周期入力制御に基づいた補助力制御を開発した。また，騎乗動作の安定性を高めるために，騎手の重心をZMP（動的安定点）上に制御する補助力制御を開発した。これらを開発した脚部補助用スマートスーツに搭載したところ，大腿部筋肉で約40～50%の負担軽減効果があることを実験的に確認した。また，手動で補助力を調整可能なスマートスーツライトを開発し，実際の調教師に着用してもらい実証実験を行ったところ，背筋で15%，大腿四頭筋で58%，ハムストリングで10%の負担軽減効果があることを確認した。

1. 序 論

北海道は古くから競走馬の産地として知られて

いる。調教騎手は1日あたり十数頭の競走馬を調教する。上体をほぼ水平に保ち，腰を深く曲げる独特の騎乗スタイルで，馬の動作に合わせて腰や膝を屈伸させるため，腰痛をかかえる騎手は少ない。我々は，これまでに弾性材と補助力調整機構からなる小型軽量装着型筋力補助装置スマートスーツを開発してきた¹⁾。これは，弾性材が発する弾性力を補助力として用い，かつ弾性材の伸長量を制御することで適切な補助力を得るセミアクティブ型筋力補助装置である。(1) 装着者の動作を制限しない・妨げない，(2) 小型かつ軽量で持ち運びやすい，(3) 簡単に短時間で装着できる，(4) 装着者に無理な力が加わらない，以上4点の特徴が挙げられる。これまで，農作業などの比較的ゆっくりとした動作を補助対象動作としてきた。

本研究では，調教騎手の腰負担軽減を目的としたスマートスーツを開発する。2つの制御法を提案し，フィールド実験によりその有効性を検証する。

2. スマートスーツ

スマートスーツは従来の大型パワーアシスト装置と違い，小型・軽量であり可搬性がある。腰部に装着された補助力調整機構により，肩から配置された弾性材の長さを制御する事によって補助力を調整する。これは，サポータのように装着しや

すく、速い動作であっても装着できるというパッシブな機構と、補助力調整機構を持つアクティブな機構の両方を持つセミアクティブ機構を有している。元々は農作業用のようなゆっくりとした動作を対象として開発され、体幹部で約15%の補助効果が確認されている。

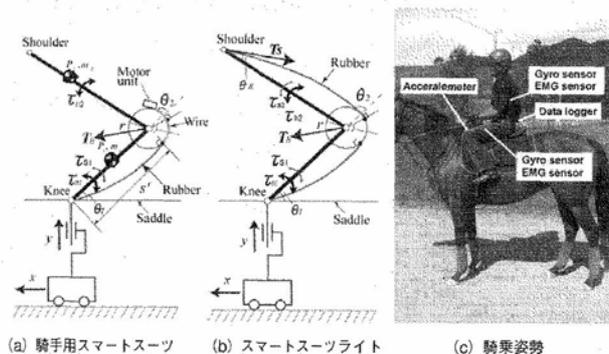


図1 騎手用スマートスーツのリンクモデル

2. 1 騎手用スマートスーツ試作機

図2に、開発した騎手用スマートスーツ試作機を示す。脚部の補助を目的とし、大腿部を覆う弾性材の長さをモータで調整し補助力の調整を行う。

図1(a)のリンクモデルを基に2つの補助力制御手法を開発した。実験室で実験を行い安全性と負担軽減効果を検証する。

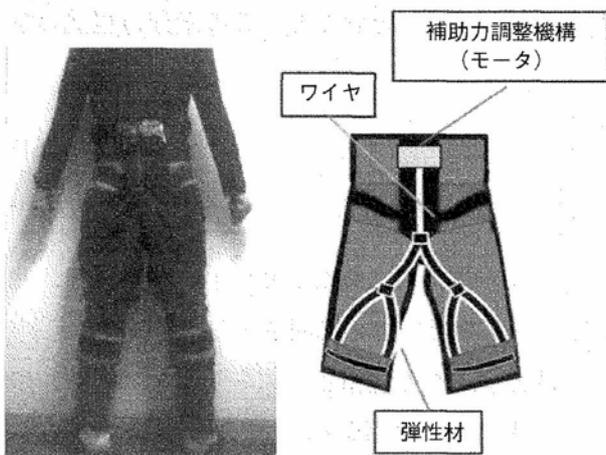


図2 騎手用スマートスーツ試作機

2. 2 スマートスーツライト

モータユニットを有さない軽量な簡易型のスマートスーツ「スマートスーツライト」の開発も行

表1 騎手用スマートスーツ試作機の仕様

本体重量	0.5Kg
バッテリー重量	0.6Kg
電源電圧	24V
弾性材バネ定数	2N/mm
制御用マイコン	H8-3694
駆動用モータ	22W コアレスDC モータ

った。図3のように補助力調整ベルトにより手動で弾性材の伸長量を変える。今回のフィールド実験にはこのスマートスーツライトを用いて負担軽減効果の検証を行った。

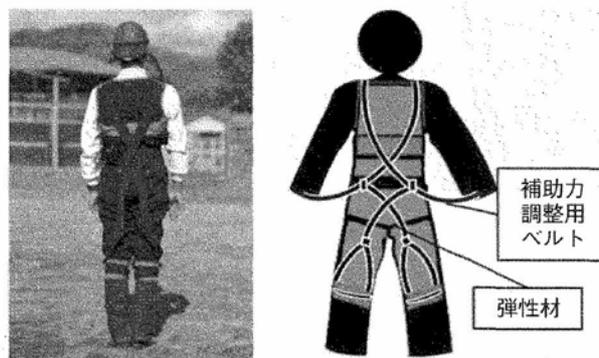


図3 スマートスーツライト

3. 補助力制御手法

騎手用スマートスーツの開発にあたり、周期入力制御とZMP (Zero Moment Point) 追従制御という2つの補助力制御機構を開発した。周期入力制御は調教師の周期的な関節の動きを補助力制御に利用し、ZMP 追従制御は調教師の重心が安定点 (ZMP) 上に配置されるように補助力を調整し余分な力の発揮を抑える。以下、それぞれの制御手法の詳細を示す。

3. 1 周期入力制御

騎乗動作では人が周期的に振動している。この振動周期は馬の歩様によって異なってくる。各歩様に合わせた周期で、弾性材の伸長量を変化させる事により、適切な補助が得られると考えられる。ここで、騎乗動作時の人の振動周期を観測する事により、伸長量を人の振動周期に合わせた周期で

制御する事を考える。そのような制御タイミングを実現するために、非線形振動子の周波数引き込み現象を利用することにより、人の振動周期を観測し、得られた周期に合わせた制御を行う事によって最適な制御を行う。

図4に周期入力制御の補助力調整のイメージを示す。騎手が深くかがんだ姿勢の際には大きな筋発揮力を必要とするので補助力を強め、逆に姿勢が浅くなった時には補助力を弱める。



図4 周期入力制御補助力調整のイメージ

3. 1. 1 騎乗動作解析

騎乗時の運動を解析するために、膝関節・腰関節とする2リンクモデルで近似した。それを図1(a)に示す。これより、関節駆動力を運動方程式を解くことによって導出した。作業トルクを τ_h 、弾性材からの補助トルクを τ_s とすると、次式のような関係で表される。

$$\tau_h = \{ \mathbf{M}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{c}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{g}(\theta) \} - \tau_s \quad (1)$$

弾性材から得られるトルクを推定するために、端点である肩と、最も屈曲している腰の2箇所に大きな力が加わると考えた。その2箇所に加わる力から補助トルクを定式化した。肩に加わる張力の方向は、肩・腰・膝を通る外接円を考え、その接線方向に働くものとする。腰に働く力は、円弧を4分割し各点に働く張力から得られる中心力の合力とする。これより、静力学関係式から補助トルクは次式で表される。

$$\begin{bmatrix} \tau_{s1} \\ \tau_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^T T_h \\ 0 \end{bmatrix} + J_2^T T_s \quad (2)$$

J_1 を大腿の1リンクのヤコビ行列であり、 J_2 は2リンクのヤコビ行列である。

3. 1. 2 周期入力制御に基づく補助力制御

騎手の運動は周期的であることから、最大の負担時のタイミングを解析し、そのタイミングに合わせた補助を行う。関節駆動力が2リンクモデルから導出されており、慣性項・重力項・遠心力、コリオリ力の項に分けられる。速い動作においては遠心力、コリオリ力の項の影響が小さい事から、慣性項と重力項が最大となるタイミングを求めた。その結果、水平腰関節角が最大となるときに、慣性項重力項ともに最大となった。よって、このタイミングに最大の伸長量となるように制御する。このような制御タイミングを実現するために、周期的入力制御²⁾を行う。非線形振動子であるVan der Pol方程式を用いる。

$$\ddot{y} - \varepsilon(1 - \dot{y}^2)\dot{y} + \Omega^2 y = K\dot{\theta} \quad (3)$$

ただし、 ε, Ω, K は正の定数であり θ は腰関節角である。 $\omega = \dot{\theta}$ とおくと、この微分方程式の解は

$$y = \beta \cos(\omega t) \quad (4)$$

$$\dot{y} = \gamma \sin(\omega t) \quad (5)$$

となり、 $\Omega \cong \omega$ 、または K が十分大きい時、水平腰関節角度と同位相で同期する。

このとき、ある位相 ψ をずらす事を考える。式(4)と式(5)の振幅を1とするようなオートゲインをそれぞれ AG_1, AG_2 を設定する。その結果が次式で表される。

$$\begin{aligned} x = & AG_1 \beta \cos(\omega t) \\ & + AG_2 \gamma \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (6)$$

ここでオートゲインの設定方法として、 y, \dot{y} の半周期前の区間の絶対値の最大値をそれぞれ $|y|_{\max}, |\dot{y}|_{\max}$ とすると次式で表される。

$$AG_1 = \frac{1}{|y|_{\max}} \quad (7)$$

$$AG_2 = \frac{1}{|\dot{y}|_{\max}} \quad (8)$$

これにより、式 (4) と式 (5) の振幅を1とすることが出来る。

水平腰関節角と同期するためには $\psi = \frac{\pi}{2}$ とすることによって同期できる。よって入力を水平腰関節角速度とした場合、位相差 ψ を与えたものを制御指令値として与える。これによって、弾性材の伸長量を関節駆動力に同期させ、関節駆動力が最大のときに最大の補助トルクを得られるような制御を行う事が出来る。よって制御目標量を次式のようにする。

$$\begin{aligned} s_p &= q(y \cos \varphi + \dot{y} \sin \varphi) \\ &= q\dot{y} \end{aligned} \quad (9)$$

3. 1. 3 補正周期入力制御

周期入力制御は、周期的なタイミングで伸長量を変化させる制御手法である。しかし、実際の騎乗時には歩様変化に伴った姿勢変化がある。このような姿勢変化によって変化する伸長量の影響を小さくし、安定した補助トルクを得られるように、姿勢変化に伴った伸長量の制御を行う。弾性材の長さの変化 s による伸長量変化量を推定する事が出来る。また、式 (4) から周期 T を導出する。

$$\begin{aligned} T &= \frac{2\pi t}{\sin^{-1}(AG_1 \beta \sin(\omega t))} \\ &= \frac{2\pi t}{\sin^{-1}(\sin(\omega t))} \end{aligned} \quad (10)$$

これより周期を算出する事が出来る。ここで、

n 周期目の s の周期平均を \bar{s} とする。 \bar{s} を0とするような制御を加える事により、姿勢変化による角度の変化によらず一定の補助トルクを得られる。このような \bar{s}_n を $n+1$ 周期目に加える。このような制御を行う方法を次式のように表す。

$$\Delta \bar{s}_{n+1} = -\frac{\bar{s}_n}{T_{n+1}} \quad (11)$$

これより、ある時刻での巻き取り速度は次式のように表される。

$$\Delta s_p(t) = (s_p(t+\Delta t) - s_p(t) - \Delta \bar{s}_{n+1}) \quad (12)$$

この制御手法を補正周期入力制御と定義した。

3. 2 ZMP 追従制御

「巧い騎手は骨で乗る」という言葉があるように、巧い騎手は騎乗時に無駄な力を使わなくとも落馬しないように安定な姿勢を保つことができる。これを、ZMP上に重心が置かれており、走行時にもそれを巧く追従していると仮定する。その追従に関するパラメータを騎乗巧否と仮定して、解析を行う。

図5にZMP追従制御の補助力調整のイメージを示す。騎手の関節角度をセンサにより検出し、2リンクモデルから騎手の重心位置を推定する。ZMPを競走馬の加速度から検出し、騎手が重心をZMP上に配置するのを助けるように補助力を

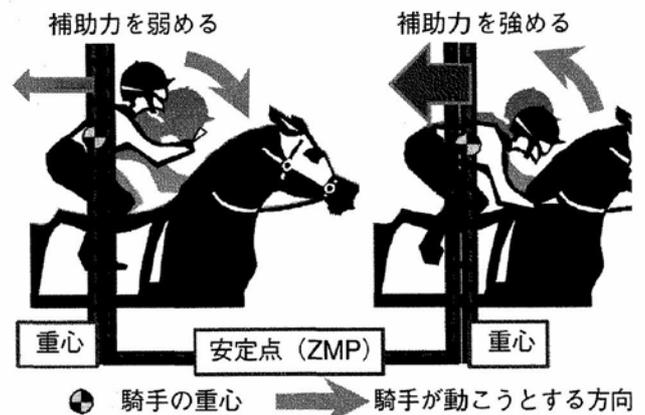


図5 ZMP追従制御補助力調整のイメージ

調整する。

3. 2. 1 Zero Moment Pointno の導出

騎手は蹬を履くため、足は固定されていると考え、膝から上の姿勢変化で重心を ZMP 上へ配置すると仮定する。図 6 のように支持点である膝関節から ZMP である P_{ZMP} の直上までを直線で結んだリンクを考え、この直線の x 軸からの角度を ZMP 角度 θ_{ZMP} として式 (13) のように定義する。

$$\theta_{zmp} = \tan^{-1} \left(\frac{\ddot{y} + g}{\ddot{x}} \right) \quad (13)$$

\ddot{x} , \ddot{y} は騎手に加えられる加速度であり、 g は重力加速度を表す。この角度上に重心があれば回転モーメントを生じず、余分な力を出さずとも姿勢を保てるため、この角度を目標とする。

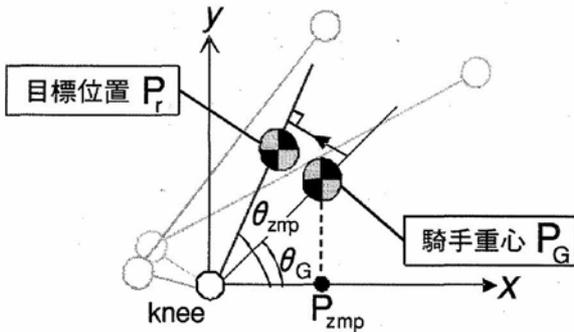


図 6 合成重心モデルと ZMP 上への最短経路

3. 3. 3 合成重心モデルによる制御目標量

騎手の上半身、大腿の重心を図 1(a) のリンクモデルから式 (14) として求めた騎手の合成重心を P_G とし、膝から P_G までの角度を θ_G として式 (15) で求める。図 6 のように ZMP への最短経路での追従を考えると、目標位置 P_r は現在の騎手重心を用いて式 (16) で表せる。同様に膝関節からの角度 θ_{ZMP} を式 (17) として求める。

$$P_G = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \end{bmatrix} = \frac{\sum m_i P_{Gi}}{\sum P_{Gi}} \quad (14)$$

$$\theta_G = \angle P_G = \tan^{-1} \left(\frac{y_G}{x_G} \right) \quad (15)$$

$$P_r = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_G + \frac{\ddot{y}+g}{(\ddot{y}+g)^2 + \ddot{x}^2} \{ \ddot{x}y_G - (\ddot{y}+g)x_G \} \\ y_G + \frac{\ddot{x}^2}{(\ddot{y}+g)^2 + \ddot{x}^2} \{ \ddot{x}y_G - (\ddot{y}+g)x_G \} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\theta_{zmp} = \angle P_r = \tan^{-1} \left(\frac{y_r}{x_r} \right) \quad (17)$$

騎乗巧否の仮定のもと、騎手の重心はある比例ゲインをもって目標姿勢角を追従すると考えられる。式 (18) を制御目標量として弾性材伸長量を制御し補助力を調整し、騎手の姿勢変化を助ける補助を行う。

$$s_z = K_z (\theta_G - \theta_{zmp}) \quad (18)$$

4. 実験

開発した騎手用スマートスーツ試作機の効果を検証するための実験を行った。補助力制御手法については、実験室での実験によりその効果と安全性の確認を行った。実際の調教師に着用してもらったフィールド実験に関しては、スマートスーツライトによりその負担軽減効果を検証する。

4. 1 補助力制御手法の検証

補助力制御手法の効果検証のための実験を研究室で行った。実験には図 2 に示す騎手用スマートスーツ試作機を使用し、調教中の調教騎手の動作を模倣し負担軽減効果の検証を行った。大腿部を覆う弾性材の伸長量を腰部の補助力調整機構で調整して補助力を調整し、大腿部の補助を行う。大腿前後の筋肉である、大腿四頭筋、ハムストリングスの筋電位を計測し、その積分値を筋負担の大きさとして計測する。また、負担軽減率は次式のように定義した。

$$\eta = \left(1 - \frac{\int |V_{EMG}| dt}{\int |V_{EMG0}| dt} \right) \times 100 [\%] \quad (19)$$

ここで、 V_{EMG} は計測対象筋電位、 V_{EMG0} は未装着時の筋電位を表す。補助力制御無し、ZMP追従制御、周期入力制御それぞれの場合について、未装着時と比較してどの程度の負担軽減効果が得られたかを表2に示す。

表2 未装着時と比較した負担軽減 [%]

	大腿四頭筋	ハムストリングス
補助力制御無し	49.5	11.5
ZMP追従制御	50.7	43.7
周期入力制御	56.8	38.4

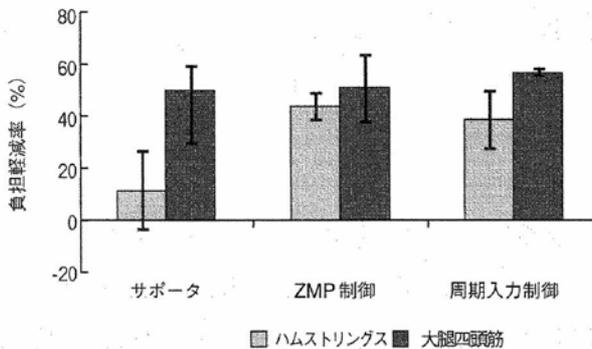


図7 未装着時と比較した負担軽減率

大腿四頭筋についてはいずれの場合にも40%程度の負担軽減効果が見られた。ハムストリングスでは、補助力制御無しでは10%程度に止まっているが、補助力制御を行うことにより50～60%の負担軽減効果を確認することができた。補助力制御無しでは片側の筋肉だけを補助しているが、補助力制御を加えることにより大腿前後の筋肉をバランス良く補助できていることがわかる。

4.2 フィールド実験

実際の調教師に図3に示すスマートスーツライートを装着してもらい負担軽減効果の検証を行った。実験は、北海道浦河町にあるチェスナットファームに協力してもらい、調教騎手は45歳男性、騎乗歴30年の方をお願いした。計測にはS&ME製のポータブルタイプデータロガーDL-2000を使用し、脊柱起立筋、大腿四頭筋、ハムストリングスの筋電位を計測し、その他、動作解析のため加速度、角速度についても計測を行った。

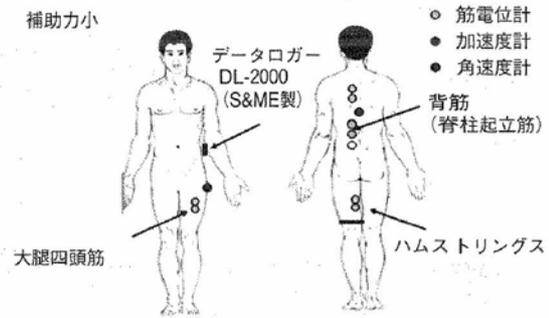


図8 計測部位

装着有無での負担軽減率を表3に示す。スマートスーツライートの装着の有無により、脊柱起立筋では15%、大腿四頭筋では58%、ハムストリングスで10%程度の負担軽減効果を確認できた。



図9 フィールド実験の様子

表3 未装着時と比較した負担軽減

	脊柱起立筋	大腿四頭筋	ハムストリングス
	15	57.5	10

5. 考察

図10にキャンター走行時の時間波形の一部を示す。脊柱起立筋において全体では15%程度の負担軽減効果が確認できていたが、さらに時間波形に注目すると、スマートスーツを装着することにより瞬時的な筋発揮力を大幅に軽減していることがわかる。このように筋肉が瞬間的に大きな力を発揮するのは、競走馬の着地時に加えられる衝撃に対して、筋肉に力を込めて関節剛性を高めて耐えるためであると思われる。このような瞬間的な大きな筋発揮力は筋疲労に繋がると考えられるので、スマートスーツによって筋疲労が和らげら

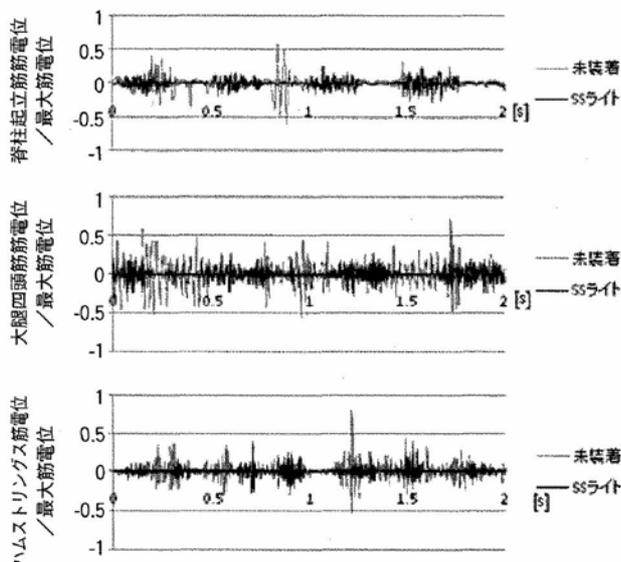


図10 各部筋電位時間波形の一部（キャンター時）

れると考えられる。

また大腿部において、フィールド実験のスマートスーツライトの結果は実験室で行った補助力制御無しの結果と同様の傾向が見られる。補助力制御無しのスマートスーツは弾性材がサポータとして働くため、大腿の補助対象筋ではスマートスーツライトと同様の効果が得られたものと考えられる。補助力制御検証の実験において負担軽減効果は、制御無しではハムストリングスで大きく大腿四頭筋で小さかったが、補助力制御を加えることによりハムストリングス、大腿四頭筋の両方で大きな負担軽減効果が確認できた。実際の調教時の使用に関しても、補助力制御を加えることによって、大腿前後の筋肉でバランスの良く、大きな負担軽減効果が期待できる。

また、スマートスーツの装着により騎乗動作が乱されることがあれば、従来通りの調教が行えなくなるという可能性がある。この点についてビデオ撮影により装着有無での騎乗動作の変化を調べたが、騎乗動作に与える影響は見られなかった。調教師へのヒアリングの結果でも「背中を起こしてくれる感じがする」との意見を頂いた。これより、調教動作を乱さずに負担軽減を行うことができたことがわかる。

6. 結論

本研究では、騎手用スマートスーツ、スマートスーツライトの2種類のスマートスーツ試作機の開発を行った。

騎手用スマートスーツの補助力制御法は周期入力制御とZMP追従制御の2種類を開発した、開発したそれぞれの制御法を研究室で検証をした結果、周期入力制御では、大腿四頭筋で51%、ハムストリングスで44%、ZMP追従制御では、大腿四頭筋で57%、ハムストリングスで38%の負担軽減効果を確認した。補助力制御無と比較し大腿前後の筋肉をバランスよく補助できることがわかった。

調教師にスマートスーツライトを装着してもらいフィールド実験を行い、実際の調教時の負担軽減効果を検証した。背筋で15%、大腿四頭筋で58%、ハムストリングスで10%の負担軽減効果を確認した。背中まで弾性材で覆うことにより背筋の負担軽減が可能であることが確認できた。また、スマートスーツの装着によって騎乗動作を妨げることなく競走馬の調教が行えることを確認した。

今回のフィールド実験では、補助力調整機構を持たないスマートスーツライトを用いたが、補助力調整機構により、開発した補助力制御法を用いれば更に多くの筋負担の軽減が可能であることがわかった。今後の研究課題として、弾性材を背中まで覆うタイプの補助力調整機構を有する騎手用スマートスーツを開発し、背筋部での補助効果の検証を行うことが挙げられる。弾性材の取り回し方による補助力の変化や、補助力調整機構の設計パラメータ等を調査・検討し騎手用に最適なスマートスーツを開発する。

謝辞

本研究は平成20年度（財）石本記念デサントスポーツ科学振興財団学術研究課題研究助成金の

補助を受けて実施した。また、本研究を進めるにあたり北海道大学工学部システム制御情報学研究室 日下 聖 君には多大なる協力をいただいた。また、実証実験を行うにあたり、(有) チェスナットファームより多大なるご尽力いただいた。ここに関係各位に感謝の意を表す。

文 献

- 1) 佐藤悠太, 田中孝之, 金子俊一, 鈴木善人, 坂本直久: 農作業用スマートスーツ第1報, 弾性材と補助力調整機構からなるスマートスーツの試作と基礎実験, 第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集CD-ROM, 3G24 (2006)
- 2) 梅枝真守, 梶原秀一, 田中孝之, 金子俊一: 周期入力制御を用いた準受動的歩行ロボットの斜度・外乱に対するロバスト性, 計測自動制御学会論文集, 42, No.8, pp.974-981 (2006)
- 3) 河村泰幸, 田中孝之, 金子俊一, 斉藤宗信, 鈴木善人, 坂本直久, 関 修治: 騎手用筋力補助装置—騎乗動作解析とシミュレーションによる腰・膝負担軽減率の検証—, 日本ウマ科学会第20回学術集会予稿集, pp.1 (2007)