

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420229

研究課題名(和文) ヒト体幹支持におけるエネルギー吸収と下肢の筋配列による機構特性の関係

研究課題名(英文) Relationship between mechanical properties of bi-articular muscles at the lower extremities and the energy absorbing system during the landing motion

研究代表者

藤川 智彦 (FUJIKAWA, Tomohiko)

大阪電気通信大学・医療福祉工学部・教授

研究者番号：80321420

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトには生体特有の二関節筋が存在し、二つの関節を同時に駆動させる。この機能により、ヒト四肢先端の運動機能に大きく貢献している。ここでは、着地時の体幹保持において、大腿部の拮抗二関節筋ペアが同時放電することに着目し、その機能をモデル解析により明らかにした。これより、着地時の拮抗二関節筋ペアの同時放電は下肢先端の剛性と出力を同時に制御するために、必要な筋活動であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The existence of bi-articular muscles greatly contributes to hybrid position and force control, and compliance control of the end point of extremities. EMG analysis shows that, during heel contact, the electrical discharges occur simultaneously in the pair of antagonistic bi-articular muscles, contributed to control of the output force direction. The theoretical robotics analysis shows that this simultaneous electrical discharge is necessary for controlling both the output forces at the heel as the point of contact, and the stiffness ellipse.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：二関節筋 着地動作 モデル解析 大腿直筋 ハムストリングス 同時放電 三対六筋

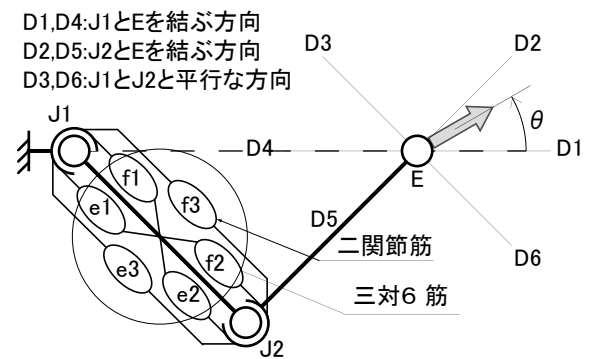
1. 研究開始当初の背景

本研究は二関節筋を含む筋配列の運動機構の解明において、工学的な手法と臨床的な知見を融合させ、その結果を運動機構の制御の観点から提示している。従来、二関節筋の機構特性は動力伝達と制御機能とされているが、我々は二関節筋だけでなく、筋配列を考慮したモデルによる理論解析と、そのモデルによる実験的解析により、筋配列の機能とヒト四肢の運動特性の関係を明らかにしている。特に、筋配列による運動制御に関する背景に次の研究成果がある。我々は二関節筋を含めた筋配列を機能的に単純化したモデルである三対六筋（図 1a）、すなわち、二関節リンクモデルにおける第 1 関節 (J1) の拮抗一関節筋ペア (f1,e1) と第 2 関節 (J2) の拮抗一関節筋ペア (f2,e2)、第 1 および第 2 関節に同時に関与する拮抗二関節筋ペア (f3,e3) で構成されるモデルを構築し、この単純化したモデルを基準に、ヒト四肢の動作筋電図学的解析およびロボット工学的理論解析をおこない、静的条件下のリンク先端 (E) に発生する出力方向 (θ) を制御する三対六筋の協調制御パターンが存在することを明らかにした (図 1b)。この三対六筋が装備したモデルの協調制御パターンはリンクの姿勢条件により定めた方向 ($D_j; j=1,2,3,4,5,6$) を基準に、その方向間で拮抗筋ペア (f_i,e_i; i=1,2,3) の活動が交替し、その拮抗筋ペアの活動の交替を順次移行させることで平面上のすべての方向へ出力を可能にしていることがわかった。さらに、我々はロボット工学分野への応用において、三対六筋が存在する二関節リンクモデルでは、リンク先端 (E) の接触負荷に対して、先端の位置・力の情報無しに、先端 (E) が負荷方向に柔軟に追従することを明らかにした (図 2)。これより、三対六筋が存在するモデルでは接触負荷に対しても負荷方向に追従し、リンク先端が滑らない。すなわち、接触負荷による変位方向と三対六筋によって発生する力の方向が絶えず一致することが明らかになった。また、これらの機能を装備させた下肢のモデルはヒトのような跳躍・着地を可能にすることができ、ヒトのようなオープンループ制御による跳躍・着地に筋配列の機構特性が大きく貢献していることが明らかになった。

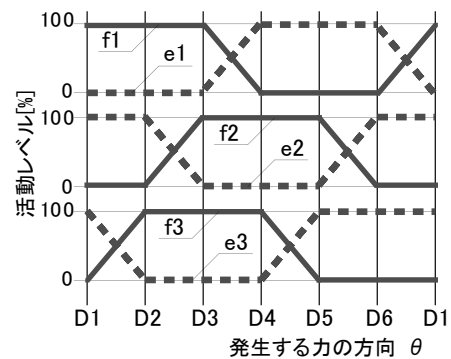
2. 研究の目的

激しい運動や急激な負荷（大きなエネルギーや衝撃）において、肉離れのような筋損傷や歩行困難となる剥離骨折が生じる。その症状が起こりやすい筋に下肢の二関節筋群（腓腹筋、大腿直筋、ハムストリングス）が挙げられる。この二関節筋は二つの関節に同時に関与する大きな筋であり、日常普遍的な動作である歩行や走行などに大きく関与する筋群である。しかし、その筋活動は特異で、かつ、冗長的である。なぜなら、これらの二関節筋は一つの関節のみを駆動させる一関節筋とは異なり、一方の関節に協同的に作用するときは他方の関節では拮抗的に作用する機能を有してい

る。そのため、一般的なリンクメカニズムでは関節駆動を阻害する機構であるとされている。しかし、ヒトを含めた陸上で生活する動物は必ず二関節筋を有しており、コンピュータのような高速演算ができない神経支配回路網でも滑らかな連続運動を可能にしている。そこで、本研究は複雑かつ高速な制御則を必要としない動物の運動に二関節筋を含めた筋配列の機構特性が根底にあることを示し、その機構特性を考慮した運動メカニズムを提示することを目指す。ここでは、運動時の体幹保持において重要な機能である着地時の体幹支持におけるエネルギー吸収に着目し、それを可能にする機械モデルをヒト下肢の筋配列から構築し、そのモデルによる理論解析と実験からヒトの筋配列によって生じる運動特性を明らかにする。さらに、この機械モデルによる解析結果とヒト着地時の動作筋電図学的解析結果を相互に検証することにより、筋の機能的な機能および筋の協調活動による運動特性を提示することを目指す。



a) 三対六筋を装備した二関節リンクモデル



b) 静的条件下の出力方向制御パターン

図1 三対六筋の協調制御パターン

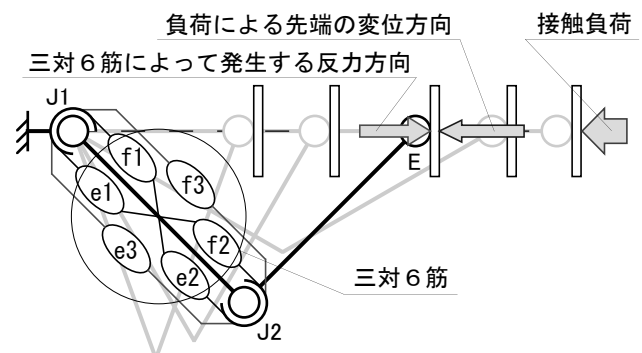


図2 接触負荷における三対六筋の特性

3. 研究の方法

本研究はヒト着地時の体幹支持におけるエネルギー吸収の機構特性を解明するために、ヒト下肢の筋配列を機能的に単純化したモデル(図3)を構築し、そのモデルにおけるロボット工学的な理論解析と実験をおこない、着地時の体幹姿勢の安定性に貢献する筋配列とその筋群の活動を明らかにした。さらに、その解析結果とヒト着地動作時における動作筋電図学的解析による筋活動パターンを統合させることで、ヒト下肢の筋配列によって発生する機構特性が着地時の運動特性に大きく貢献していることを証明した。そのため、機械モデルによる解明だけでなく、ヒトの着地時の動作筋電図学的解析との整合性を明らかにするため、動作筋電図学的解析を中心に着地時の姿勢支持における筋活動を計測した。また、基準となる着地姿勢は大腿部の三対6筋の筋群が大きく関与する踵を着地点としたエネルギー吸収の場合とし、着地点上に重心がある懸垂下垂からの踵着地動作を基準に、着地時の姿勢変化における筋活動を明らかにした。被験者は本学の学生と研究関係者とし、被験筋は皮膚表面双極誘導法を用いるため、図3の下肢の筋配列を機能的に単純化したモデルを基準に、大腿部の三対6筋である大臀筋(f1)、外側広筋(e2)、大腿二頭筋短頭(f2)、大腿直筋(e3)、ハムストリングス(f3)の5筋と、下腿部の腓腹筋(f5)、ヒラメ筋(f4)、前脛骨筋(e4)の3筋の計8筋を主に選択した。なお、筋e1は深筋のため、表面筋電図では計測できず、筋f5に拮抗する二関節筋はヒトには存在しない。また、筋活動の確認は三対6筋の協調制御パターン(図1b))の出力方向と筋活動の関係を利用し、最大等尺性随意収縮の筋放電量の計測にも三対6筋の協調制御パターンを用いた。これらの実験条件に基づき、動作筋電図学的解析システム(高速度ビデオカメラ、床反力計、ゴニオメータ、筋電計)を用いて、すべてのデータを同期して、解析用パソコンに取り込んだ。さらに、このヒトを対象とした解析を基に、ヒト下肢の筋配列を機能的に単純化した機械モデルを構築し、着地時の体幹支持における力学特性を明らかにし

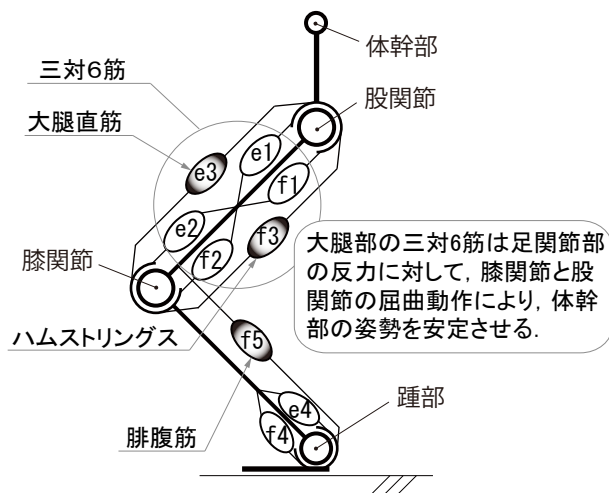


図3 構築する下肢の機械モデル

た。ヒトのような着地時の安定した姿勢を詳細な情報無しに可能にする要因として、筋活動パターンによって発生する弾性楕円(スティフネス楕円)とその出力を求め、二関節筋である大腿直筋とハムストリングスの拮抗二関節筋ペアの活動と姿勢保持の関係を明らかにした。

4. 研究成果

(1) 懸垂下垂からの踵着地における筋活動は12名の被験者で同様の傾向が得られたため、代表的な筋活動の積分筋電図と実験中の姿勢変化のスティックピクチャとそのときの床反力をベクトル表示にしたものを図4に示す。図中の姿勢Aは離手直後、姿勢Bは着地時、姿勢Cは着地後床反力最大時、姿勢Dは膝最大屈曲時、姿勢Fは着地立位安定時である。なお、下肢下腿部の被験筋である足関節の一関節背屈筋である前頸骨筋(f4)と下腿部後面の二関節筋である腓腹筋(f5)の筋活動は踵着地の確認のために計測しているため、この2筋の筋活動は図示していない。姿勢B-F間の踵着地後に膝関節の一関節伸展筋である内側広筋(e2)と大腿部前面の二関節筋である大腿直筋(e3)、股関節の一関節伸展筋である大臀筋(f1)に顕著な筋活動が見られた。また、大腿部後面の二関節筋であるハムストリングス(f3)も大きな筋活動が確認できた。このように着地動作中には大腿部の拮抗二関節筋ペアの同時放電が生じていることがわかった。なお、床反力は常に体幹方向を向いていることもわかった。

(2) 懸垂下垂からの踵着地の動作筋電図結果を基に、図3の単純化した二関節リンクモデルによる出力特性の理論解析をおこなった。モデル姿勢はもともと膝関節が屈曲した姿勢Dの膝関節角度を90度とする静止姿勢とした。この姿勢Dにおける体幹保持の出力特性について、三対6筋の拮抗筋ペアの1つが収縮した場合の踵部の出力方向を図5に示す。この図内の u_{f_i}, u_{e_i} ($i=1,2,3$)は筋 f_i, e_i ($i=1,2,3$)の収縮力である。三対6筋の各拮抗筋ペアの収縮力の差が踵部の出力要素となり、その方向は姿勢条件で定まる方向 D_j ($j=1-6$)上となる。方向D1-D4は股関節と踵部を結ぶ方向、方向D2-D5は膝関節と踵部を結ぶ方向、方向D3-D6は股関節と股関節を結ぶ方向と平行な方向である。これにより、踵着地時に体幹を安定させるには、踵部の発生する床反力方向が鉛直方向となる必要がある。すなわち、股関節の拮抗一関節筋ペア(f_1, e_1)の収縮力の差によって発生する方向D1上の力ベクトルと、拮抗二関節筋ペア(f_3, e_3)の収縮力の差によって発生する方向D6上の力のベクトルを合成すると鉛直上になる必要がある。そのため、股関節の拮抗一関節筋ペア(f_1, e_1)の収縮力の差と拮抗二関節筋ペア(f_3, e_3)の収縮力の差が等しくなければならないことがわかった。すなわち、

$$u_{f_1} - u_{e_1} = u_{e_3} - u_{f_3} \quad (1)$$

の関係にならなければならないことがわかった。

(3) 懸垂下垂からの踵着地の動作筋電図結果を基に、図3の単純化した二関節リンクモデルによる剛性特性の理論解析をおこなった。モデル姿勢はもともと膝関節が屈曲した姿勢Dの膝関節角度を90度とする静止姿勢とした。この姿勢Dにおける体幹保持の剛性特性について、三対六筋の収縮力によって発生する踵部の弾性楕円(ステイフネス楕円)の形状を図6に示す。この図内の u_{f_i}, u_{e_i} ($i=1,2,3$)は筋 f_i, e_i ($i=1,2,3$)の筋収縮力であり、この三対六筋の拮抗筋ペアの収縮力の和が弾性楕円の要素となり、踵部に発生する弾性楕円が形成される。筋の弾性は収縮力に比例して大きくなるため、収縮力 u が大きくなると弾性係数 ku (k : 定数)も大きくなる。図6の楕円は弾性楕円であり、基本モデルはすべての収縮力が等しい場合の弾性楕円である。この三対六筋の収縮力が等しい弾性楕円を基本として、そのうちの一つの拮抗筋ペアの収縮力の和が2倍、すなわち、ある拮抗筋ペアの弾性係数が2倍になった場合の結果を示す。筋 f_1 と e_1 の収縮力が2倍($2u_{f_1}+2u_{e_1}$)になると、筋 f_1 と e_1 の弾性係数は $2k_1u_{f_1}+2k_1u_{e_1}$ (k_1 : 定数)になり、弾性楕円の軸が方向D2に傾き、筋 f_3 と e_3 の収縮力が2倍($2u_{f_3}+2u_{e_3}$)になると、筋 f_3 と e_3 の弾性係数は $2k_3u_{f_3}+2k_3u_{e_3}$ (k_3 : 定数)になり、弾性楕円の軸が方向D6に傾くことがわかった。さらに、この2つの楕円の傾きは同じであり、鉛直軸に対して線対称となっていた。なお、弾性楕円の軸と床反力の方向が一致しない場合、体幹が保持できないため、弾性楕円の軸は鉛直上にならなければならない。すなわち、拮抗二関節筋ペア(f_3, e_3)の収縮力の和と股関節の拮抗一

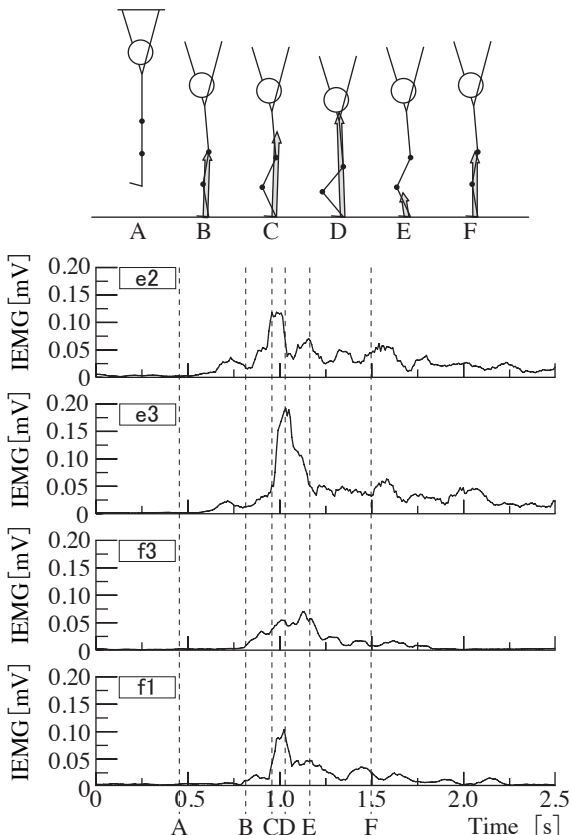


図4 踵着地時の大腿部の筋群の積分筋電図

関節筋ペア(f_1, e_1)の収縮力の和が等しくなければならないことがわかった。これより、

$$2k_3(u_{f_3}+u_{e_3})=2k_1(u_{f_1}+u_{e_1}) \quad (2)$$

の関係にならなければならないことがわかった。

(4) 懸垂下垂からの踵着地の動作筋電図学的解析と二関節リンクモデルを用いた理論解析の結果から、踵着地時の最大屈曲姿勢において、安定した姿勢保持をおこなうには、股関節の一関節筋(f_1, e_1)と拮抗二関節筋ペア(f_3, e_3)の収縮力の差によって発生する踵部の出力が等しいこと(式(1))、股関節の一関節筋(f_1, e_1)と拮抗二関節筋ペア(f_3, e_3)の収縮力の和によって発生する踵部の弾性係数が等しいこと(式(2))の2つの条件を満たす必要がある。また、筋 f_1 の活動が主動筋 e_1 に比べて、微小である($u_{f_1}=0$)と仮定すると、式(1)と式(2)の関係式から、

$$k_3(u_{f_3}+u_{e_3})=k_1u_{f_3} \quad (3)$$

の関係が得られる。この式(3)は踵着床の姿勢保持において、大腿部の拮抗二関節筋ペア(f_3, e_3)が同時放電しなければ、踵部に発生する力と弾性を調整できない

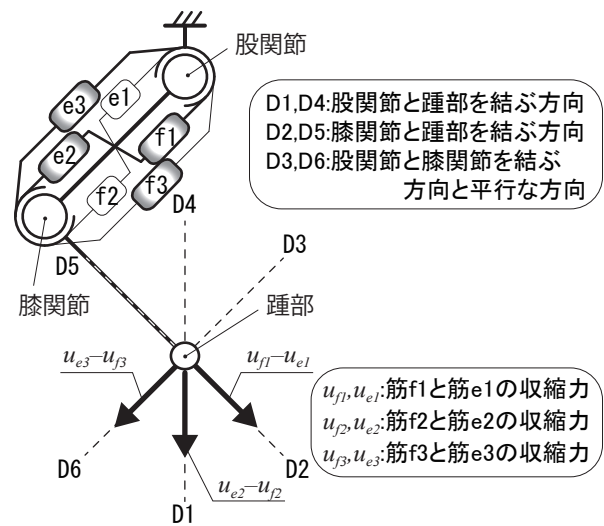


図5 踵着地時に発生する支持点の力

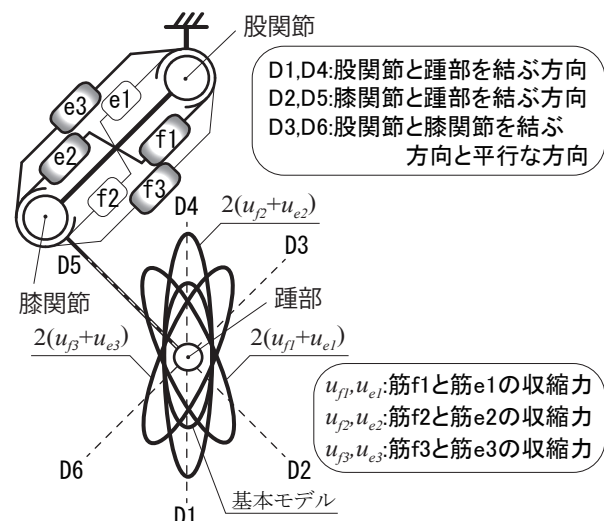


図6 踵着地時に発生する支持点の剛性

いことを示している。すなわち、ヒト下肢のように大きさが異なる筋とそれに応じた異なる弾性係数を持つ条件下において、大腿部の拮抗二関節筋ペア（大腿直筋とハムストリングス）の同時放電による収縮力の和と差の相違を利用することにより、股関節の拮抗筋ペア（f1,e1）の弾性係数と出力の調整をおこない、踵着地時の姿勢を安定させていることが明らかになった。また、ヒトの踵着地動作において大きなエネルギー吸収を必要とする場合、必ず大腿部の拮抗二関節筋ペア（f3,e3）の同時放電が起こり、自然に弾性と力を調整し、体幹を保持していると考えられる。

<引用文献>

- ① 藤川智彦, 百生登, 鳥海清司, 大島徹, 下肢の筋配列を考慮したリンクモデルの機構特性, バイオメカニズム 21, 2012, pp.167-177.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 阿部友和, 小出卓哉, 古川公宣, 越智亮, 大島徹, 藤川智彦, 立ち上がり動作時における大腿直筋の平行リンク機能, 日本ロボット学会誌, 査読あり, 32 巻, 2 号, 2014, pp.100-107.

[学会発表] (計 13 件)

- ① 万野真伸, 仲川亘, 小出卓哉, 阿部友和, 藤川智彦, 足趾着地における二関節筋の筋活動, 第 36 回バイオメカニズム学術講演会, 2015.11.29, 信州大学 (長野県上田市).
- ② 小出卓哉, 万野真伸, 阿部友和, 藤川智彦, 立ち上がり動作における大腿部二関節筋の筋活動, 第 2 回日本基礎理学療法学会学術集会 日本基礎理学療法学会第 20 回学術大会 合同学会, 2015.11.15, 神奈川県立保健福祉大学 (神奈川県横須賀市).
- ③ 万野真伸, 小出卓哉, 大島徹, 藤川智彦, 一関節筋と二関節筋による生体内力の機能別実効筋の算出方法, 第 2 回日本基礎理学療法学会学術集会 日本基礎理学療法学会第 20 回学術大会 合同学会, 2015.11.14, 神奈川県立保健福祉大学 (神奈川県横須賀市).
- ④ 仲川亘, 万野真伸, 小出卓哉, 阿部友和, 藤川智彦, 着地動作時における下肢二関節筋の筋活動による機構特性, LIFE2015(生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2015), 2015.9.8, 九州産業大学 (福岡県福岡市).
- ⑤ 藤川智彦, 小出卓哉, 万野真伸, 跳躍着地モデルの機構特性を考慮したヒト下肢の筋活動, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会 (JIASC2015), 2015.9.4, 大分大学 (大分県大分市).
- ⑥ 清原一輝, 万野真伸, 小出卓哉, 大島徹, 藤川智彦, 一関節筋と二関節筋の協調による出力分布の計測

- 方法, 日本機械学会北陸信越支部第 52 期総会・講演会, 2015.3.7, 新潟工科大学 (新潟県柏崎市).
- ⑦ 清原一輝, 万野真伸, 小出卓哉, 大島徹, 藤川智彦, 一関節筋と二関節筋による生体内力の機能別実効筋力の算出方法, 第 24 回ライフサポート学会フロンティア講演会, 2015.3.6, 東京電機大学 (東京都足立区).
 - ⑧ 小出卓哉, 万野真伸, 阿部友和, 藤川智彦, 立ち上がり動作における大腿直筋の活動, 第 1 回日本基礎理学療法学会学術集会 日本基礎理学療法学会第 4 回学術大会 合同学会, 2014.11.15, 名古屋学院大学 (愛知県名古屋市).
 - ⑨ 清原一輝, 万野真伸, 小出卓哉, 藤川智彦, 筋配列を考慮した四肢先端の出力評価とその計測方法の検討, 第 1 回日本基礎理学療法学会学術集会 日本基礎理学療法学会第 4 回学術大会 合同学会, 2014.11.15, 名古屋学院大学 (愛知県名古屋市).
 - ⑩ 仲川亘, 万野真伸, 小出卓哉, 阿部友和, 藤川智彦, 踵着床における大腿部の拮抗二関節筋ペアの機能的効果, LIFE2014(生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2014), 2014.9.24, ルスツリゾート (北海道虻田郡).
 - ⑪ 小出卓哉, 万野真伸, 阿部友和, 藤川智彦, 立ち上がり動作における大腿部の二関節筋の活動, LIFE2014(生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2014), 2014.9.24, ルスツリゾート (北海道虻田郡).
 - ⑫ 万野真伸, 小出卓哉, 阿部友和, 村岡利英, 藤川智彦, 踵着床における拮抗二関節筋ペアの同時放電による機能, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, 2014.9.5, 九州工業大学 (福岡県福岡市).
 - ⑬ 万野真伸, 阿部友和, 村岡利英, 藤川智彦, 踵着床における大腿部の拮抗二関節筋ペアの機能, 第 23 回バイオメカニズムシンポジウム, 2013.7.28, ホテルルビノ京都堀川 (京都府京都市).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等はない

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤川 智彦 (FUJIKAWA Tomohiko)

大阪電気通信大学・医療福祉工学部・教授

研究者番号: 80321420