

機関番号：32660
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009～2010
 課題番号：21700226
 研究課題名（和文）末梢神経障害患者転倒抑制のための神経刺激遅延歩行モデリングに関する研究
 研究課題名（英文）A study of Nerve Stimulation Delayed Walking Modeling for Fall Prevention of Peripheral Neuropathy Patients
 研究代表者
 竹村 裕 （TAKEMURA HIROSHI）
 東京理科大学・理工学部・講師
 研究者番号：60408713

研究成果の概要（和文）：高齢者の転倒および転倒による怪我の予防は急務であり，末梢性神経障害患者は健常者に比べて非常に多く転倒・怪我をしている．本研究では，足からの触覚刺激と歩行動作との関係に着目し，冷却により神経刺激遅延歩行を模擬し，不整地による被験者歩行計測実験を実施した．足底の触覚感度の鈍化が歩行を不安定にする大きな要因の一つであるという転倒予防の指針となる新たな知見を得た．さらに，微細な振動刺激により触覚感度が向上することを明らかにし，転倒防止の新たな可能性を示唆した．

研究成果の概要（英文）：Prevention of falls and fall related injuries in older people is social issues, and patients with peripheral neuropathy have so many falls and injuries compared to healthy subjects. In this study, we focused on the relationship between tactile sensibility and walking stabilization. Measurement experiments of nerve stimulation delayed walking by using ice immersion were conducted. These experimental results suggest that plantar tactile sensitivity is one of the major factors for fall prevention. Furthermore, we found that tactile sensitivity is improved by micro vibration, suggesting new possibilities for preventing falls.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：デジタルヒューマンモデル，足底触覚情報処理，歩行解析，転倒予防

1. 研究開始当初の背景
 歩行動作は，人間にとって重要な基本動作
- であり，日常生活を送る上で欠かせない動作の一つであるが，高齢者の転倒や転倒による

怪我は大きな社会問題なりつつある。高齢者の10~40%が年間に一回以上の転倒を経験しており、その約5%が骨折に結びついている。骨折は寝たきりに繋がる大きな要因であり、転倒要因の解明、転倒および転倒による怪我の予防対策は急務である。さらに、糖尿病によくみられる症状で手や足などの長い末梢神経系から障害が起きる末梢性神経障害患者は、健康な高齢者に比べて6倍もの転倒を経験し、15倍もの転倒による怪我をしている。このことから、足裏などの末梢からの神経刺激がバランスコントロールに深く関与していることは明らかであるが、このことに関する研究はほとんど無い。触覚刺激に着目して、非常に複雑な歩行運動のメカニズムの解明や転倒の抑制を試みることは極めて価値が有る。

2. 研究の目的

本研究では、足からの触覚刺激と歩行動作との関係に着目し、触覚刺激の遅延が歩行動作に及ぼす影響を明らかにし、触覚刺激を利用して転倒予防の指針となる新たな知見を探ることを目指している。そこで本研究では、具体的に下記の2点を主の目的とした。

(1) 足底触覚刺激の変化が不整地歩行運動に及ぼす影響：より触覚の影響が大きい不整地歩行での足底触覚刺激量の変化に伴う歩行動作のバラツキ度を計測し、触覚の鈍化・遅延と転倒リスクの関係を明らかにする。

(2) 足底触覚刺激の積極的利用により転倒回避の可能性を検討：触覚感度の向上が見られれば、転倒リスク低減につながるため、確率共鳴を利用した微細な振動刺激により足底触覚感度の向上を試みる。

3. 研究の方法

(1) 足底触覚刺激の変化が不整地歩行運動に及ぼす影響の計測実験

①計測手法：

被験者は健康男子8名(21.9 ± 0.8歳)、計測には光学式モーションキャプシステム(ライブラリー社製、ひまわり GE60/W)を用いた。被験者の歩行動作を8台のモノクロカメラで追跡する。カメラはフレームレート120fpsで撮影を行い、この連続静止画から歩行動作の解析を行う。

②人工疑似不整地：

歩行する不整地は、屋内で実験・計測を行う都合上、また、路面の再現性も考慮した結果、人工の凹凸不整地を製作して実験に用いた。不整地の概略図を図1に、また制作した不整地の写真を図2に示す。これは全長8000mm×幅910mmの薄手の布製カーペットの裏面に、縦30×横50×高さ15[mm]の紙系ベークライト製のブロックを貼付することで凹凸路面を再現したものである。凹凸路

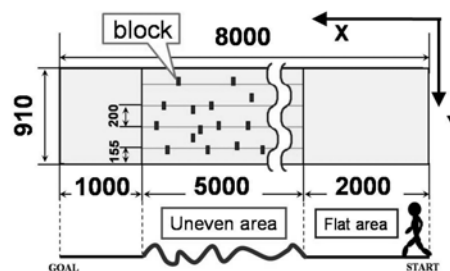


Fig. 1 Image of uneven terrain

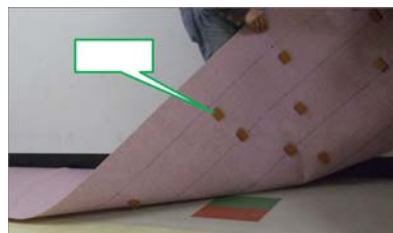


Fig. 2 Photograph of uneven terrain



Fig. 3 Image of ice immersion

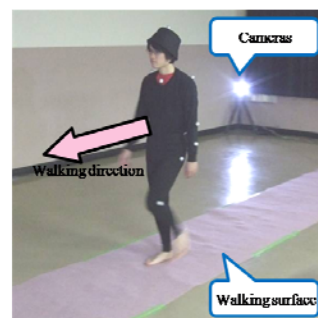


Fig. 4 Scene of the measurement

面はキャリブレーション範囲から長さ5000mmに設定した。不整地歩行動作計測時には、凹凸路面上での歩行動作が計測され、計測範囲内でおおよそ6歩分の動作計測が可能となっている。人間の歩行においては、歩き始めから定常歩行に至るまでにおおよそ3歩の距離を必要とする。本研究では、被験者の定常歩行における測定を行うため、凹凸路面の手前2000mmと後ろ1000mmには凹凸のない平坦路面を設け、助走・余白の区間とした。尚、整地歩行路については、不整地歩行路と同材質で、ブロックの貼付されていないカーペットを用いた。計測範囲については、不整地歩行動作計測時と同様である。

③足底触覚鈍化の手法：

足底触覚の差異による動作の違いをみるためには、触覚以外の要因をできる限り排除

する必要があるが、本研究では足底触覚の減少および刺激遅延を発生させる手法として、氷水による冷却手法を採用した。これにより、同一の被験者で足底触覚が鈍化した場合と、そうでない通常時との比較が行われる。過去の知見に基づき、足底冷却をする場合は、足底部(踝下から足底までの部分)を、氷水に30分間連続で浸水させ冷却する手法をとった。冷却の概略図及び冷却中の様子は図3に示す。この際、浸水による足底皮膚のふやけ、変形を防止するため、被験者の足底と、氷水の間にはポリエチレン製の薄膜を敷き、被験者の足底部が、直接氷水に接触しないよう措置を施した。尚、計測及び冷却手法を施す際には、被験者には事前に実験の趣旨と内容についての十分な説明を行い、協力の承諾を得た被験者のみ実験を実施した。

④その他計測条件：

計測は、先に述べたカーペット路面を、カーペットの末端から反対側の末端まで歩行する間の動作計測を行った。まず、足底冷却を実施しない状態で8トライアルの計測を行い、その後足底冷却を実施、続けて足底冷却状態で8トライアル計測した。計測時、被験者は裸足状態とし、足底を冷却した場合には、冷却効果の有効時間を考慮して、計測は8トライアルを5分程度で行った。冷却後の計測において、トライアル間の追加冷却は実施せず、30分の足底冷却実施後、8トライアルをまとめて計測した。

計測中の歩行速度や歩き方に関しては、こちらから特に制限を設けず、進行方向と「被験者の歩きやすいように」という指示のみを与え、さらに不整地歩行時については、最大速度歩行時の計測も行った。最大速度歩行とは、被験者に対して、可能な限り速い速度で歩行することを指示するものである。計測回数は被験者1人に対して、各条件下で、足底冷却を行わない通常時を8トライアル(末端から末端までの一回の歩行を1トライアルとする)、足底冷却を行った場合を8トライアル、合計48トライアル行った。この計測の様子を図4に示す。統計学的解析として両側t検定を用い、 $p < 0.01$ の場合を有意差があると判断し、 $p < 0.05$ の場合有意差傾向ありと判断した。

(2) 確率共鳴を利用した微細な振動刺激により足底触覚感度の向上計測実験

①確率共鳴：

確率共鳴とは、微弱な信号にノイズを加える事で、信号の検出率が向上するという現象である。ノイズは通常、信号の検出や伝達を阻害するものとして扱われることが多いが、適切な強度のノイズは確率共鳴により信号検出能を向上させることが報告されている。しかし、確率共鳴によって信号検出能を向上

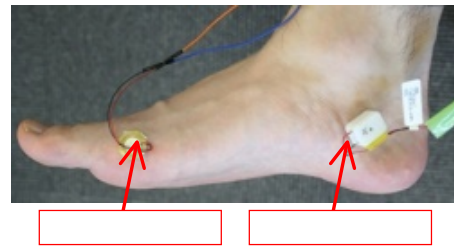


Fig. 5 Positions of vibrators



Fig. 6 Signal detectability-noise intensity diagram

させるには、ノイズの強さを適切なものに調整する必要がある。ノイズが弱すぎれば確率共鳴の効果が表れず、強すぎれば検出させたい信号がノイズで覆い隠されてしまうからである。

② 触覚感度向上実験概要：

本研究では、確率共鳴によって足裏の触覚感度が向上することを確認するために、バイブレーターにより振動ノイズを加えながら右足の拇指球の触覚感度を測定し、ノイズ強度と触覚感度の関係を調べる。振動の種類と振動子の取り付け位置が異なる二つの実験A、Bを行う。

実験Aにおいては、振動ノイズには200[Hz]の方形波を使い、右足側面の拇指球横に振動を与える。この位置を選択したのは、拇指球に近い部位にノイズを加えることで、拇指球からの感覚を伝える信号にノイズが重なりやすいためである。それに対して実験Bにおいては、振動ノイズに正規乱数を利用した0~200[Hz]の周波数範囲を持つランダム振動を使い、右足の足根管上に振動を与える。足根管は血管や足底神経が集中して通過する部分であり、ここに振動を加えれば足底の感覚を伝える信号にノイズを重ねられるためである。図5に両実験のバイブレーター取り付け位置を示す。

③ 触覚感度向上実験方法：

拇指球の触覚感度を確認するためには、図6に示すようなSemmes-Weinstein Monofilamentを使用する。Semmes-Weinstein Monofilamentはすべての被験者に対してエバリュエータサイズ3.22(ターゲットフォース0.161[g])のものを使用した。これは、被験者が、フィラメントの刺激をかるうじて認識できる程度の刺激である。触覚感度測定実験は、実験A、Bそれぞれにおいて、振動ノイズの強さを変えながら20回ずつの試行を実施する。まず実験前に、被験者に対して、実際にフィラメントを押し付けて、フィラメントの

感触を確認させる作業を実施する。次に、被験者に対し、「1 から 20 までの試行のうち、いずれか 10 回ではフィラメントを押し付け、残る 10 回では何もしないので、フィラメントの接触を感じた試行を記録するように」と指示する。その上で、試行時に、1 から 20 の番号を宣言しながら実験を実施する。どの試行でフィラメントを押し付けるかと、どの強さの振動ノイズを付加するかとの二点に関しては、ランダム化して被験者にはわからないようにして、先入観を持たせないようにする。また、20 回の試行中、振動ノイズの強さは一定に保ち、20 回の試行が終わってから振動ノイズの強さを変更する場合には、10 秒程度の間隔をあけてから実験を再開する。

4. 研究成果

(1) 触覚鈍化に伴う整地・不整地歩行動作 3 次元計測結果

計測によって取得したデータの中から、今回は被験者の歩行速度、歩幅、歩隔に着目した。図 7, 図 8, 図 9 に、各条件下での歩行速度 (the gait velocity), 歩幅 (the step length), 歩隔 (the step width) について、全被験者分の平均値および標準偏差を示す。図中のマーカが各計測値を、エラーバーが各計測値の標準偏差を示し、各条件下の非冷却時の計測値を 100[%] として正規化し、その値からの変化量を示している。この際、各計測値の標準偏差についても、同様の割合で正規化を行ったものを図中に表記している。歩行速度は被験者の胸部に貼付したマーカの進行方向移動量をもとに算出、また歩幅、歩隔は被験者の左右踝部に貼付したマーカより算出し、歩幅は一連の歩行動作中の左右足の平均値である。整地歩行については、足底冷却による触覚鈍化の前後において、各計測値に統計的有意差は見られなかった。一方、不整地歩行時には、歩行速度に制限のない場合、足底冷却によって被験者の歩行速度および歩幅が有意に減少した。また、最大速度歩行時には、被験者の歩幅が有意に減少し、歩隔の標準偏差に増加傾向がみられた。尚、各計測における歩行速度の平均値は、整地自由速度歩行において、非冷却時 1.33[m/s], 冷却時 1.36[m/s], 不整地自由速度歩行において、非冷却時 1.28[m/s], 冷却時 1.19[m/s], 不整地最大速度歩行において、非冷却時 2.12[m/s], 冷却時 2.06[m/s] であった。

(2) 足底触覚感度の向上計測実験結果

実験 A では、ある被験者が振幅 0.6[μm] の条件下で最大値を取り、振幅が遠ざかるにつれて正答率が下がるという傾向を示したものの、その他の被験者は逆に振幅 0.6[μm] の条件下で最低値をとる。また、被験者全員の試験結果をまとめた平均を示した図 10 を見る

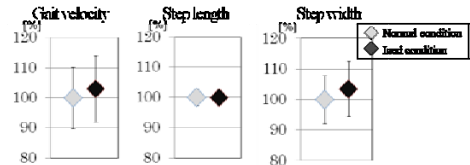


Fig. 7 Result of even terrain (free velocity)

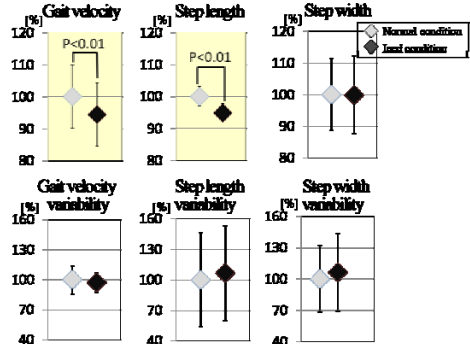


Fig. 8 Result of uneven terrain (free velocity)

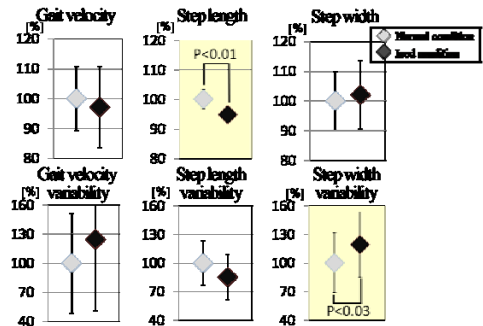


Fig. 9 Result of uneven terrain (maximum velocity)

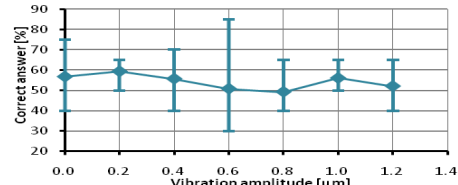


Fig. 10 Noise intensity-average correct answer at experiment A

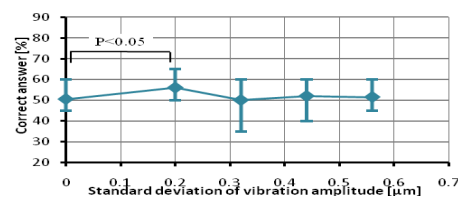


Fig. 11 Noise intensity-average correct answer at experiment B

と、振動なしの条件と比べて平均正答率が向上しているのは、最も弱い振幅 0.2[μm] の条件のみであり、ほかの条件では振動なしの条件時の正答率に及ばなかった。正答率のばらつきも大きく、はっきりとした傾向は見られない。両側 t 検定を行った結果、有意差は見られなかった。以上より、実験 A においては、確率共鳴の効果を確認することはできなかった。次に、実験 B において被験者別に正答率と振動ノイズの強さとの関係をまとめた

結果の平均を求めた結果を図 11 に示す。実験 B においては、正答率を被験者別に示した図 11 をみると、実験 A に比べて被験者ごとの正答率の変化が似た傾向を示す部分が多く、振動なしの条件時よりも高い正答率となる部分が多い。振動振幅の標準偏差が $0.20[\mu\text{m}]$ の時に 5 人、 $0.44[\mu\text{m}]$ の時に 4 人の被験者が振動なしの条件時より高い正答率となる。また、被験者全員の結果をまとめて両側 t 検定を行ったところ、振幅の標準偏差が $0.2[\mu\text{m}]$ の場合のみ、ノイズがない条件に対して、有意な正答率の向上が見られた ($P < 0.05$)。このことから、実験 B については、振幅の標準偏差が $0.2[\mu\text{m}]$ の条件下において、確率共鳴による足底触覚感度の向上効果が確認された。

(3) 研究成果のまとめ

本研究では、人間の足底触覚が歩行動作に影響を及ぼしているという仮説のもとに、整地下と凹凸不整地下において、足底触覚に着目した歩行動作計測を行った。歩行動作計測の結果、整地歩行に関しては、足底冷却による触覚の減少および遅延が、歩行に有意差を与えなかった。不整地歩行については、足底触覚の変化前後で、被験者の歩行速度と歩幅が有意に減少し、触覚の鈍化がない通常時と比較して有意に歩行動作が変化するという結果が得られた。また、本計測の結果より、加齢と歩行動作の変化との相関を示唆する現象も確認でき、足底触覚に着目することが、高齢者の転倒事故を防止する一助になることが示唆された。

さらに、高齢者の転倒防止対策へ応用することを目的として、確率共鳴の概念のもとに、足底以外の部位へ振動刺激を与えた際の、足底触覚感度の変化を、実験によって測定した。その結果、拇指球近くに $200[\text{Hz}]$ の方形波振動を加えた場合は触覚感度の有意な変化は確認できなかったが、足根管上にランダムな振動刺激を加えた場合は、触覚感度の有意な向上が確認された。このことは、確率共鳴を用いて足裏の触覚感度を向上させるために与えるノイズ刺激は、必ずしも足裏に直接与える必要はないということを示唆している。また、ノイズが適切であれば、すでに触覚感度が衰えた高齢者などではなく、健康な若い人間に効果が確認できた本実験の結果からは、確率共鳴による足底触覚感度の向上を通じた歩行安定性の向上効果が、幅広い人々に期待できる。

転倒予防のために筋力強化のような対策は、高齢者や、運動能力の十分でない対象には身体的負担が大きい。足底触覚に着目した歩行メカニズムの解明を行うことで、より負担が少なく、採用が容易な対策方法の提案を目指すことで、転倒事故に対して有効な対策

が講じられる。本研究の成果により、微細振動刺激によって足底の触覚感度が向上することが明らかになり、この現象を利用して歩行動作の安定性を向上させることで、高齢者の転倒事故を抑制する新たな手法の可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Shinichiro SUZUKI, Akira CHAKI, Kentaro SEKIGUCHI, Ming DING, Hiroshi TAKEMURA and Hiroshi MIZOGUCHI, "Influence of Reduced Plantar Sensation for Human Gait in Various Terrain," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.2, pp.258-265, 2011. (査読有)
- ② A. Chaki, S. Suzuki, K. Sekiguchi, H. Takemura, and H. Mizoguchi, "Feature Point Extraction and Tracking from Plantar Image for Plantar Skin Deformation Measurement," Proceedings of the 1st International Conference on Applied Bionics and Biomechanics, 2010. (査読有)
- ③ S. Suzuki, A. Chaki, M. Ding, K. Sekiguchi, H. Takemura and H. Mizoguchi, "Influence of Plantar Insensitivity for Human Gait on Even and Uneven Terrain," Proceedings of the 1st International Conference on Applied Bionics and Biomechanics, Venice, 2010. (査読有)
- ④ Shinichiro Suzuki, Akira Chaki, Kentaro Sekiguchi, Hiroshi Takemura, and Hiroshi Mizoguchi, "Influence of Plantar Insensitive for Human Gait in Regular and Irregular Terrain", Proceedings of 6th World Congress of Biomechanics, pp.107-110, 2010. (査読有)
- ⑤ Kentaro Sekiguchi, Shinichiro Suzuki, Hiroshi Takemura, and Hiroshi Mizoguchi, "Walking Analysis by 6-axis Force Sensor for Simultaneous Measuring of Plantar Deformation", IEEE SENSORS 2009 CONFERENCE, pp.177-180, 2009. (査読有)
- ⑥ H. Kim, JK. Richardson, J. Nadim, H. Takemura, JA. Ashton-Miller, "A shoe-based method for randomly perturbing the stance phase of gait and its effect on step width," The annual meeting of the American Society of Biomechanics, 2009. (査読有)
- ⑦ Kentaro Sekiguchi, Shinichiro Suzuki, Hiroshi Takemura, and Hiroshi Mizoguchi, "Development and Experiment of walking by 6-axis Force Sensor for Simultaneous Measuring of Plantar Deformation",

ICROS-SICE International Joint Conference 2009, pp.3831-3834, 2009. (査読有)

- ⑧ Kentaro Sekiguchi, Shinichiro Suzuki, Masahiro Ueda, Hiroshi Takemura, and Hiroshi Mizoguchi, "Experiment for Walking Analysis by 6-axis Force Sensor for Simultaneous Measuring of Plantar Deformation", The 24th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, pp.1052-1057, 2009. (査読有)
- ⑨ Shinichiro Suzuki, Kentaro Sekiguchi, Hiroshi Takemura, and Hiroshi Mizoguchi, "Influence of Plantar Sensation Decrease on Lower Limbs for Human Gait under Uneven Surface", The 24th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, pp.740-742, 2009. (査読有)

[学会発表] (計10件)

- ① 鈴木 信一郎, 茶木 亮, 丁 明, 竹村 裕, 溝口 博, "足底触覚変化が不整地歩行時の歩行速度・歩幅・歩隔に及ぼす影響", 第31回 バイオメカニズム学術講演会 (SOBIM 2010 in Hamamatsu) 講演論文集, pp. 247-250, November 6-7, 2010. (静岡大学 浜松キャンパス, 静岡県浜松市)
- ② 茶木 亮, 鈴木 信一郎, 丁 明, 竹村 裕, 溝口 博, "不安定歩行早期発見を目的とした足裏皮膚変形測定装置の開発", 第31回 バイオメカニズム学術講演会 (SOBIM 2010 in Hamamatsu) 講演論文集, pp. 129-132, November 6-7, 2010. (静岡大学 浜松キャンパス, 静岡県浜松市)
- ③ 茶木 亮, 鈴木 信一郎, 関口 健太郎, 竹村 裕, 溝口 博, "足裏皮膚変形の画像測定に向けた足裏画像からの特徴点抽出と追跡" 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 講演論文集, pp. 1A2-F27, June 13-16, 2010. (旭川大雪アリーナ, 北海道旭川市)
- ④ 茶木 亮, 関口 健太郎, 鈴木 信一郎, 竹村 裕, 溝口 博, "歩行中足裏変形の画像測定に向けた特徴点抽出と追跡" 日本機械学会関東支部 第49回学生員卒業研究発表講演会, pp. 285-286, March 10, 2010. (明治大学)
- ⑤ 関口 健太郎, 鈴木 信一郎, 茶木 亮, 竹村 裕, 溝口 博, "足裏変形同時計測のための6軸力センサによる足底冷却時の歩容計測", 私立大学学術研究高度化推進事業・学術フロンティア推進事業「ホリスティックアプローチによる計算科学の新展開」最終成果報告会, Jan 31, 2010. (東京理科大学野田校舎, 千葉県野田市)

- ⑥ 鈴木 信一郎, 関口 健太郎, 茶木 亮, 竹村 裕, 溝口 博, "足底触覚減少による歩行動作変化の歩行路面状況での比較", 私立大学学術研究高度化推進事業・学術フロンティア推進事業「ホリスティックアプローチによる計算科学の新展開」最終成果報告会, Jan 31, 2010. (東京理科大学野田校舎, 千葉県野田市)
- ⑦ 関口 健太郎, 鈴木 信一郎, 竹村 裕, 溝口 博, "足裏変形同時計測のための6軸力センサによる歩行解析と検証" 生体医工学シンポジウム 2009 講演論文集, pp. 1-3-03, Sep 18-19, 2009. (千葉大学, 千葉県千葉市)
- ⑧ 鈴木 信一郎, 関口 健太郎, 竹村 裕, 溝口 博, "冷却による足底触覚減少及び刺激遅延の不整地歩行動作への影響" 生体医工学シンポジウム 2009 講演論文集, pp. 4-2-03, Sep 18-19, 2009. (千葉大学, 千葉県千葉市)
- ⑨ 関口 健太郎, 植田 真裕, 竹村 裕, 溝口 博, "足裏変形同時計測のための6軸力センサによる歩行解析" 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 講演論文集, pp. 1A1-F17, May 24-26, 2009. (福岡国際会議場, 福岡県福岡市)
- ⑩ 鈴木 信一郎, 関口 健太郎, 植田 真裕, 竹村 裕, 溝口 博, "不整地歩行において足底触覚の刺激遅延が下半身動作に及ぼす影響", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 講演論文集, pp. 1A1-F18, May 25, 2009. (福岡国際会議場, 福岡県福岡市)

[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]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹村 裕 (TAKEMURA HIROSHI)
東京理科大学・理工学部・講師
研究者番号：60408713