

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2012

課題番号：21686025

研究課題名（和文） 装着型人支援機器による恒常的身体拡張技術に関する研究開発

研究課題名（英文） Homeostatic enhancement technologies to increase affinity of wearable assistive gear

研究代表者

長谷川 泰久（HASEGAWA YASUHISA）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：70303675

研究成果の概要（和文）：本研究では、恒常的に装着可能な装着型人支援機器を目指し、装着型支援機器の親和性を向上させる技術の研究開発を行った。具体的には、アクティブエアマットによる着脱性の改善、接触圧力の動的分散、湿度上昇の抑制を静止時および運動時において確認を行った。また、支援力を一定の割合で分散させる新しい外骨格構造を提案し、指先力精度を低下させることなく指に加わる負荷を低減した。

研究成果の概要（英文）：This project developed wearable technologies to improve affinity of the assistive gear and device so that a user could continue to use the device for a long time. For example, an active air mattress installed in a forearm part of the support system actively holds a human forearm quickly and firmly, and then changes the contacting areas with a human skin in order to maintain adequate blood circulation around the contacting area. Exhaust air from air chambers is reused to ventilate around a forearm skin. The second technology developed in this project is a new structure of the exoskeleton that evenly distributes the assistive force into a user and an environment so that a user could control total grasping force including the assistive force with the same precision as one human has.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2009年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2010年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2011年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2012年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総 計	20,500,000	6,150,000	26,650,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：人間機械システム、支援機器

1. 研究開始当初の背景

これまでに、上肢および下肢の運動機能を支援する装着型支援機器の研究開発を行い、健常者に対して力支援および障害者に対して機能支援の臨床実験を行ってきた。これらの実験を通して、日常生活において支援機器を長時間使用するには、脱着性を含む親和性の向上が不可欠であるが、現在効果的な対策

が存在しない。特に、運動機能麻痺患者においては恒常的に支援機器の使用が想定されるが、擦過傷や血行不良による皮膚の壊死など深刻な問題が未解決である。

2. 研究の目的

身体に装着し、その身体動作を支援する機器では、そのシステムの有用性を評価する上

で親和性は大変重要な要素となる。そこで、恒常的に装着可能な装着型人支援機器を目指し、装着型支援機器の親和性を向上させる技術の研究開発を行い、健常者および障害者の恒常的身体拡張を実現する。

3. 研究の方法

親和性において、着脱プロセスが容易かどうかなど短時間で評価可能な項目を「短期親和性」とし、長時間装着した際に評価される項目を「長期親和性」と定義する。更に、下記の各評価項目に対して対策を行う。

a) 短期親和性（着脱プロセスの容易さ）

- ・着脱時間
- ・着脱に必要な作業量
- ・装着時の一体感／拘束感

b) 長期親和性 I（静止時での快適さ）

- ・一体感／拘束感
- ・血流確保
- ・温度・湿度

c) 長期親和性 II（運動時の快適さ）

- ・一体感／拘束感
- ・温度・湿度
- ・操作性

本プロジェクトでは、まず操作性として、

- ① 支援システムにて増幅された力の精度に着目し、その精度が人の持つ力制御精度を低下させることなく、力増幅が可能な外骨格構造を提案する。発揮力のレンジが広く、精度が高い指先把持力を対象に、指先把持力を支援する把持力支援システムを製作し、提案する外骨格構造を用いることで、従来より精度が向上し、人本来の精度と同等になることを実験により比較・確認する。次に、
- ② 支援システムを容易に短時間で装着でき、長時間装着しても不快とならない短期・長期親和性を両立する機構として、アクティブエアマットを提案する。このアクティブエアマットを外骨格型前腕支援システムに搭載し、その親和性を評価し、その有効性の検証を行う。

4. 研究成果

(1) 指先力精度を向上させる外骨格構造

① 提案する指先外骨格構造

成人男性と同等の把持力を発生することのできる把持力支援システム（図 1）を製作し、指先力精度を向上させる指先部の外骨格構造を提案した。本支援システムの詳細な構造については、「主な発表論文等」の第 1 論文を参照されたい。

物体の状態を認識する際、人の手が直接物体に触れることで得られる触感是非常に重要な情報である。人が生来有する感覚フィードバックは、対象とする物体に合わせて力を適切に制御し、安全かつ器用に把持すること



図 1 把持力支援システム

を可能にする。しかし、システムが装着者の意図に応じて、大きな支援力を発生したとき、装着者の指先のみが把持物体に触れる構造では、装着者の指部に過度な力が加わる危険性がある。逆に、外骨格のみが把持物体に触れる構造では、装着者は接触状態だけでなく、システムが発生する支援力も感知できず、正確に把持することは困難である。

この問題を解決すべく、本プロジェクトでは装着者の指も外骨格も把持物体に触れる指先の外骨格を採用した。更に、装着者は外骨格から把持物体に伝わる力も含めて全把持力を推定するので、把持物体に直接伝わる支援力と、装着者の指を介して伝達する支援力の割合は常に一定でなければならない。よって、これを実現する伝達率一定型（Fixed Ratio Transmission Type; FRT-type）外骨格を提案した。その外観を図 2、構造を図 3 に示す。これは、主外骨格（Exoskeleton）、示指接触部（Index Finger Contact Part）、および物体接触部（Environment Contact Part）から構成されている。また、左右に分かれた物体接触部は円弧形の金属部品（黒色）により固定され、示指接触部と物体接触部はワイヤによって連結している。

システムの支援力はまず主外骨格に伝えられ、主外骨格に固定されたシャフトから、示指接触部と物体接触部を連結するワイヤに伝達される。それによりワイヤに張力が生じ、示指接触部と物体接触部がそれぞれ人の示指と把持物体に一定の割合で力を加える。人の示指と把持物体に加わる支援力の割合は、示指接触部と物体接触部を連結するワイヤの屈曲角度 ϕ_i によって決定される。ワイヤの屈曲角度は示指側が $\phi_f = 28^\circ$ 、物体側が $\phi_f = 42^\circ$ となっている。ここで、人の示指と把持物体に伝達される支援力の割合は、物体に伝わる支援力を F_{object} 、人の示指に伝わる支援力を F_{index} とすると、 $F_{object} : F_{index} = \cos 42^\circ : \cos 28^\circ \approx 0.74 : 0.88 \approx 1 : 1.2$ となる。すべての支援力が示指に加わる外骨格構造では、人の発生力を 1 とし外骨格からの支援力も 1 とすると、装着者の指には合計 2 の負荷を受ける。FRT-type では上述の分配率によって外骨格から装着者への支援力は 0.545 と

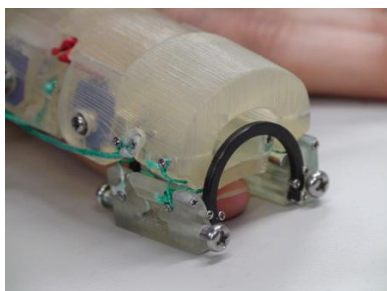


図2 提案する指先外骨格

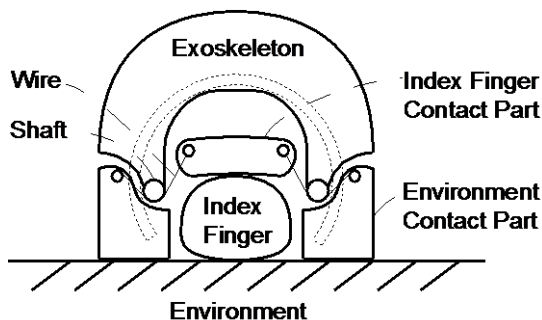


図3 提案する外骨格の構造

なるので指への負荷は合計 1.545 となる。つまり、すべての支援力が示指に加わる外骨格構造と比べて、この示指外骨格は装着者の負荷を約 23%低減している。

② 指先力精度評価実験

被験者 4 名の平均値と標準偏差、有意確率を図 4 に示す。「N」は支援システムを装着していないケース、「FRT」は提案する伝達率一定型外骨格が示指と親指に装着されているケース、「D」は伝達率一定型外骨格が示指のみ装着されているケースを表す。

この結果をもとに統計解析ソフト SPSS を用いて、反復測定による一元配置分散分析後、多重比較を行い、伝達率一定型外骨格と外骨格 D、外骨格 D とケース N 間において、5%水準で有意差が認められた。また、そのうち 2 名の被験者では、伝達率一定型外骨格は非装着時のケース N とほぼ同等の指先力精度を実現した。

(2) 装着の容易化および快適性の向上を実現するアクティブエアマット

① アクティブエアマットの必要性

褥瘡とは皮膚が壊死する病態であり、皮膚潰瘍の一つである。主な原因として、持続的な圧迫による血行不良や湿潤によるものから、加齢や低栄養などによるものがある。特に骨が突出しており脂肪や筋肉の薄い部位において、毛細血管圧である 32mmHg 以上の体圧が持続的に加わると発症しやすいといわれている。また、一度褥瘡が発症すると完治には非常に時間がかかるため、褥瘡予防の研究が行われているが、これらはエアマット

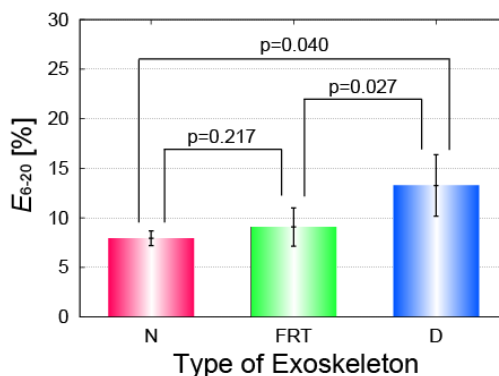


図4 指先精度評価実験結果

やエアクッションなどの寝姿勢や座位姿勢時におけるものであり、装着型の支援システムには適用されていない。また、仙骨部や大転子部、坐骨部などには体重が集中しやすく、発症しやすいとされているが、前腕支援システムにおいても、長時間装着し静止した状態であることを考えれば、肘などにも十分発症の危険性がある。そのため、支援システムにも褥瘡予防を考慮する必要があるといえる。そこで、外骨格型前腕支援システムにアクティブエアマットを搭載することにより、その問題点の改善を行った。

② アクティブエアマットの構造

提案するアクティブエアマットは、独立した複数のエア室が膨張と収縮を繰り返すことによって能動的に体圧の分散および血行促進、皮膚表面の強制換気を行うエアマットである。このアクティブエアマットの性能を評価するために、図 5 に示す外骨格型前腕支援システムを製作し、図 6 のようにアクティブエアマットを搭載した。

本アクティブエアマットは、図 7(a)に示すように独立した 3 系統(A, B, C)の空気室を 2 セット有し、システム外部のコンプレッサからの給気を電磁弁で制御することによって膨張と収縮を行う。このアクティブエアマットは、3 つの稼働モードを持つ。1)すべての空気室内の圧力を大気圧とする全収縮モード、2)コンプレッサから空気を供給し、すべての空気室が設定圧力となった全膨張モード、3)図 7(b)に示すように A, B, C の 3 系統のエアマットは順次膨張と収縮を繰り返し、褥瘡の原因となる 32mmHg 以上の圧力が常に加わっている部分が順次、体幹側へ移動することで血液を能動的に送り出すことができるアクティブモードである。また、図 7(a)中の Vent と記載されている箇所にて、空気室からの排気を装着部位へ導くことにより、皮膚表面の強制換気を行う。

③ 短期親和性評価

a) 着脱時間・作業量 システムの着脱の容易さを示す指標として、着脱時間と着脱に

必要となる作業量がある。まず、装着時間の評価として、図 8(a)で示すようなマジックテープによる拘束を行う場合と、図 8(b)に示すようなアクティブエアマットによる拘束を行う場合に必要とする時間の比較を行う。マジックテープによる拘束では、手首側と肘側の2か所に腕を締め付ける部位が設けてあり、装着側と反対の手を用いてマジックテープを操作することになる。また、アクティブ

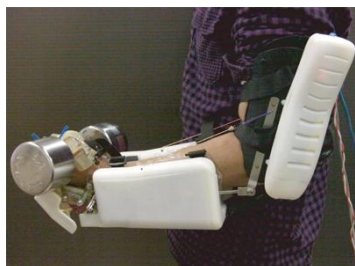


図 5 製作した外骨格型前腕支援システム

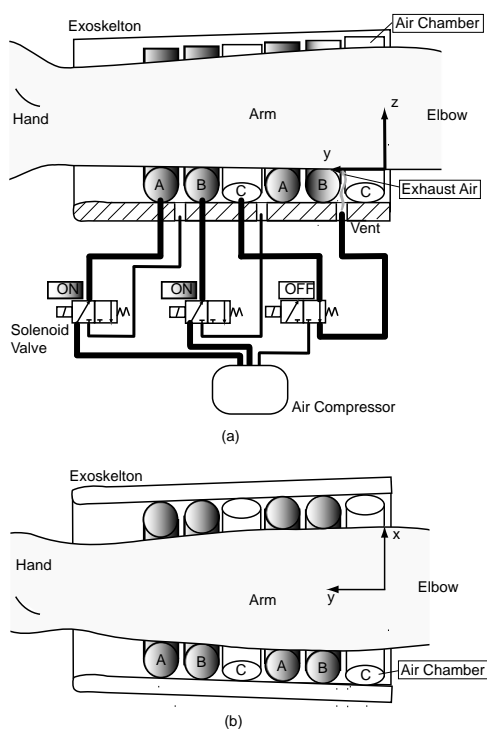


図 6 提案するアクティブエアマット構造

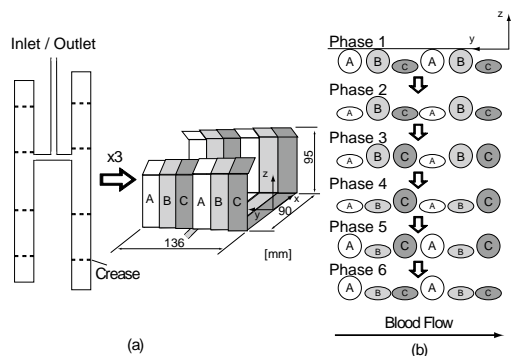


図 7 アクティブエアマットの動作

エアマットでは、電磁弁を操作するスイッチが設けてある。

エアマットへの供給圧力を 0.02MPa とし、20 代前半の男性の健常者による比較実験結果、着脱の双方でアクティブエアマットが必要とする時間は半分以下となっている。もし、装着者が高齢者や麻痺が両側にある場合には、マジックテープの操作に時間が必要であり、着脱時間の差は大きくなることが予想される。また、作業量としては、マジックテープはテープを留める作業を、機器装着する手（左手）とは反対の手（右手）で、2 回繰り返すのに対し、エアマットは給気開始のボタンを押すだけであり、作業量が大幅に軽減されている。



図 8 マジックテープまたはアクティブエアマットによる拘束

b) 装着時の一体感／拘束感 システムの親和性を悪化させる要因の一つに、身体と外骨格のずれが挙げられる。外骨格が軽量で、人の動きに遅れなく追従している際は、外骨格を身体の一部として認識しやすくなる。そこで、身体の動きへの追従性について評価を行う。前回の実験と同様にマジックテープとエアマットによる2つの拘束方法において評価する為に、システム側と装着者側に加速度センサ（ZMP 社製 IMU-Z）を取り付け、一定間隔で腕を左右に振り、動作が安定してから10 秒間システムと腕に付けた加速度センサ値の計測を行う。ここで、エアマットへの供給圧力は、前回同様に 0.02MPa とする。また、システムと装着者のずれ A_f を求める式として以下の式を用いる。

$$A_f = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n \sqrt{(a_{sysk} - a_{armk})^2} \quad [m/s^2] \quad (1)$$

ここで、システム側の加速度を $a_{sys}(k)$ 、装着者側の加速度を $a_{arm}(k)$ 、データの測定回数を n とする。2 つの拘束方法におけるシステム側と装着者側の加速度の差を図 9 に示す。式 (1) を用いて計算の結果、マジックテープによる拘束では $A_f = 0.115$ 、エアマットの場合 $A_f = 0.052$ となり、エアマットによって拘束を行った場合、使わないものに比べて半分以下となっている。

④ 長期親和性評価（安静時）

a) 接触圧力計測 製作したアクティブエアマットを用い、実際の外骨格型前腕支援システム装着時と同様、エアマット上に前腕を載

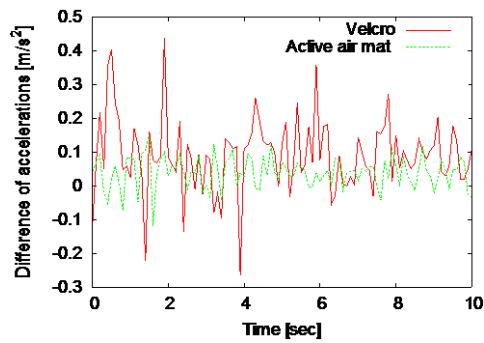


図9 前腕と外骨格との加速度差

せて脱力した状態にて、I-SCAN シート（ニッタ社製）を前腕とアクティブエアマット間に挿入して接触圧力分布を測定した。エアマットへの供給圧力を 0.02MPa とし、エアマットの持つ 6 つの動作フェーズを 2 秒毎に切り替える。測定された圧力分布を図 10 に示す。なお、表示の下限を 32mmHg としているため、白色部は 32mmHg 以下であり、32mmHg を超える部分は青から赤(150mmHg)の 13 段階のグレースケールで示されている。

エアマットが膨張しているエリアでは前腕の荷重を支えているため、32mmHg 以上の高い圧力値を示しているが、マットが収縮しているエリアの荷重は 32mmHg 以下に抑制できている。また、各空気室が接触している部位毎に 6 つのエリアに分類し、各エリアの最大接触圧を測定すると、エアマット膨張時の体圧は平均 53.09mmHg であり、収縮時は平均 13.83mmHg となった。これにより、すべての動作フェーズにおいて、エアマットが収縮している部位では 32mmHg を十分に下回っており、圧力に関する褥瘡発生条件を回避できている。

一方、エアマットを用いない場合には肘部の接触圧力が 126.40mmHg となり集中的に荷重が加わるが、エアマットを用いすべての空気室を膨張させると、その集中荷重が 61.96mmHg まで抑制することができる。しかし、エアマットにより圧力の集中は緩和されているが、すべての空気室を同時に膨張させ腕の荷重を支える状態であっても、6 つのエリアの平均圧力が 45.42mmHg となった。つまり、すべてのエリアで 32mmHg を上回り、血流が阻害される危険がある。そこで、アクティブに順次、膨張させる空気室を切り替え、32mmHg 以下のエリアを体幹側へ移動させることで、血流を確保する必要がある。

b) 血流評価 血流と皮膚温には密接な関係があり、血液が体を巡ることで皮膚温は維持されている。そのため、血流阻害などにより血流量が低下すると皮膚温も低下する。また、片方の腕に圧迫を加えた場合、圧迫の度合いが強まってくるほど圧迫していない側の掌との温度差が大きくなる。そこで、提案する

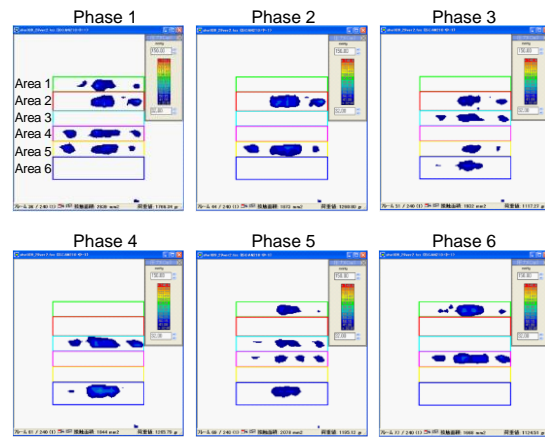


図10 前腕の接触部位の圧力分布

アクティブエアマット使用時における前腕部の血流について、手の皮膚温を計測することで評価した。

実験手順として、まず、左腕をアクティブエアマットに挿入し、掌を上方に向けて脱力し静止した状態とし、右腕はアクティブエアマットに挿入せず同様の姿勢とする。温湿度計には KN ラボラトリーズ社製のハイグロクロンを使用し、左右の掌に載せる。次に、静脈の血流と同じ方向にアクティブエアマットの切り替えを行う場合、静脈と反対方向に切り替える場合、エアマットをすべて膨張させた場合の 3 つのエアマットの状態において、それぞれ左右の掌の皮膚温を 0.5 分間隔で 15 分間計測する。血流量や皮膚温は同一個人でも自律神経活動の状態などにより個人内差があるため、左右の条件を反転させて計 6 回の計測を行った。詳細な実験データは、「主な発表論文等」の第 2 論文を参照されたい。

20 代前半の男性 3 名に対して、各アクティブエアマットの状態ごとに、通常の掌の皮膚温に対するエアマットを装着した側の皮膚温の差の平均値を図 11 に示す。負の値では、エアマット装着側の皮膚温が低いことを表す。全ての被験者において、アクティブエアマットを全膨張させた際は、アクティブエアマット装着側の皮膚温が大きく低下している。これより、血流が阻害されているといえる。また、静脈と反対方向に切り替えるものでも若干の低下が見られ、静脈の血流の一部が阻害されていると考えられる。そして、静脈の血流と同じ方向にエアマットを膨張させた場合は、血流の低下がほとんど見られず、長時間システムを装着しても血流を阻害することがないといえる。

c) 温度・湿度評価 エアマットの排気を換気として再利用した際の装着部位の温度・湿度の変化を計測する。まず、ハイグロクロン（KN ラボラトリーズ社製）をアクティブエアマット上に載せ、その上から前腕を載せ、エアマットの稼働・非稼働時において前腕周辺

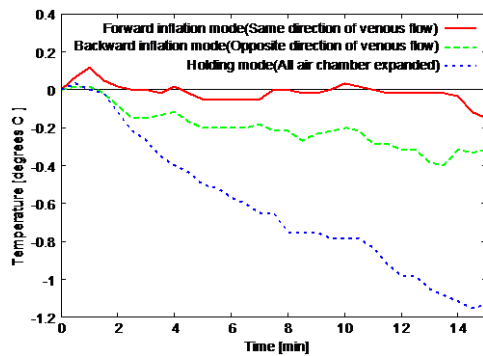


図 11 左右の掌の温度差

の温度・湿度を計測した。アクティブエアマットを可動したことによる温度の低下はわずかであったが、湿度は換気により大きく抑制できたため、蒸れによる不快感は改善し、褥瘡発生条件の1つである湿潤に対しても抑制する効果が得られた。更なる詳細な実験データは、「主な発表論文等」の第2論文を参照されたい。

⑤ 長期親和性評価（運動時）

装着者が運動を行い、支援システムが力支援を行っている場合には、腕の自重に加え、支援システムから人への支援力が作用する。また、装着者の運動量増加により安静時よりも発熱量および発汗量が増加する。よって、接触力および温度・湿度について再度、提案するアクティブエアマットを評価した。

ダンベルの上げ下げによって湿度が大幅に上昇した際に、アクティブモードに切り替えると、15分以降に大幅な湿度の低減が見られ、予めアクティブモードにしておいたものは、初めから湿度の上昇があまり見られなかった。これによって、動作支援中の湿度上昇による不快感の改善が行われているといえる。しかし、温度については、安静時と同様に大きな低減効果は得られなかった。紙面の都合上、温度および湿度の詳細な実験データおよび運動時の前腕の接触圧力については、「主な発表論文等」の第2論文を参照されたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計2件）

1. 長谷川泰久、有山哲理、上林清孝、武藤淳一、外骨格による把持力支援時に母指感覚が及ぼす指先力精度への影響、日本ロボット学会誌、査読有、Vol. 31 No. 4 pp. 63-71、(2013)。
2. 長谷川泰久、田山宗徳、齊藤壮文、長谷川誉晃、山海嘉之、アクティブエアマットによる支援機器の親和性の改善、日本ロボット学会誌、査読有、Vol. 30 No. 8 pp. 759-766、(2012)。

〔学会発表〕（計5件）

1. Yasuhisa Hasegawa, Tetsuri Ariyama and Kiyotaka Kamibayashi, Pinching Force Accuracy Affected by Thumb Sensation in Human Force Augmentation, The 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012), pp.3943-3948, 2012年10月7日～12日, Vilamoura, Portugal.
2. IKEDA Takahiro, MATSUSHITA Akira, SAOTOME Kosaku, HASEGAWA Yasuhisa and SANKAI Yoshiyuki, Pilot study of floor-reactive-force generator mounted on MRI, -compatible lower-extremity motion simulator-, The 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012), pp.311-316, 2012年10月7日～12日, Vilamoura, Portugal.
3. Yasuhisa Hasegawa, Junichiro Tokita, Kiyotaka Kamibayashi and Tetsuri Ariyama, Accuracy Improvement of Pinching Force Augmentation by Exoskeleton, The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp.1494-1499, 2012年6月22日～27日, Rome, Italy.
4. Yasuhisa Hasegawa, Munenori Tayama, Takefumi Saito and Yoshiyuki Sankai, Active air mat for comfortable and easy to wear a forearm support system, The 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2011), pp. 4899-4904, 2011年9月29日, San Francisco, USA.
5. Yasuhisa Hasegawa, Junho Jang, and Yoshiyuki Sankai, Cooperative control of exoskeletal assistive system for paraplegic walk -Transferring between sitting posture and standing posture, and going up and down on stairs-, The 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.757-762, 2010年12月16日, Tianjin, China.

〔その他〕

ホームページ等

<http://kine.iit.tsukuba.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 泰久 (HASEGAWA YASUHISA)
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号：70303675