

医療福祉ロボット研究の実証実験における課題

Challenges in the Evaluation Experiment for Healthcare Robot

○ 中島康貴(九大、早大) 安藤健(パナソニック、早大) 小林洋(早大) 藤江正克(早大)

Yasutaka NAKASHIMA, Kyushu University and Waseda University

Takeshi ANDO, Panasonic Corporation and Waseda University

Yo KOBAYASHI, Waseda University

Masakatsu G. FUJIE, Waseda University

Abstract: In development of healthcare robot in practical use, it is significant that discussion with not only researcher about mechanical engineering but with medical doctors and physical therapists, experts, staffs and so on. In our previous study, we have been collaborated on (1)A gait training robot assisted by physical therapist for hemiplegia patients and (2)Split belt treadmill based gait rehabilitation system for symmetric stroke gait, (3)An exoskeleton to support eating movement in patients with essential tremor, (4)Quantitative evaluation of finger dexterity based on factor analysis of handwriting motion, (5)A walking balance training device for the elderly persons with visual feedback system using foot pressure and posture information. In this paper, we described the results and extracted problems in previous evaluation experiments.

Key Words: Healthcare, Robot, Evaluation experiment, Individual difference, Single case study

1. 序論

医療福祉の分野で実用化に向けた研究を行うためには、機械工学の研究者の立場の意見だけでなく、医療や介護福祉従事者などの専門家との議論を通じた取り組みが重要である。これまで著者らは理学療法士の介助動作を再現する歩行訓練ロボットや本態性振戦患者の腕のふるえを抑制する装具などの研究を病院の医師や施設の専門家と共同で取り組んできている。本稿では、これまでの実証実験における成果とそれを通して抽出された課題について報告する。

2. 研究事例

2-1 理学療法士の介助動作を再現する歩行訓練ロボット

脳卒中により片麻痺となった患者は、主に理学療法士(PT)によるハンドリングというリハビリ手法により、歩行の再獲得を行う。ハンドリングではPTが片麻痺患者の症状に応じてアシスト量を決定するために、片麻痺患者に適したアシストが可能である。しかし、歩行訓練はPTへの身体的負担が大きく、特に長時間同じ動作を繰り返す量的な訓練を行うことが困難である。このような状況に対して、現在様々な歩行訓練ロボットが開発されている。ロボットで訓練を行うことの利点として、長時間・正確な動作が可能ということが挙げられる。しかし、現在開発されている歩行訓練ロボットでは、片麻痺患者の左右非対称性などに対応した動作を行うことが出来ない。そこで、本研究では、PTのハンドリング動作をロボットにより模擬することを目的とした。この目的を達成するために、PTが片麻痺患者に与える力と片麻痺患者の骨盤動作の関係を数式化したハンドリングモデルの構築に取り組んだ。また、構築したモデルをもとにロボットの制御手法を決定し、PTのハンドリングを模擬した動作を生成した。

まず、模擬片麻痺患者に対するハンドリング動作計測を行い、片麻痺患者を対象とした計測を行うための実験方法や計測項目を明らかにした。予備実験の結果を踏まえ、平地歩行における片麻痺患者に対するPTによるハンドリング動作の計測実験を行った(Fig. 1(a))。この実験は、早稲田大学の「人を対象とする研究に関する倫理委員会」の承認の下、実施された(承認番号2011-052、以下で同様に

委員会の承認を得た実験は承認番号のみ記載)。被験者はBr. stage IV~VIの片麻痺患者5名に協力していただいた。計測により、片麻痺患者に対するハンドリングの方法と、その効果を明らかにした。また、実験結果を基にPTが片麻痺患者に与える力と、片麻痺患者の骨盤動作の関係をモデル化し(Fig. 1(b))、適用性を3名の被験者における結果から確認することができた⁽¹⁾。

構築したモデルを基に、著者らがこれまでに開発してきた介助マニピュレータの制御に導入することで、PTのハンドリング動作を模擬した動作をロボットにより生成することを可能とした(Fig. 1(c))。PTの動作を模擬したロボットの動作を、模擬片麻痺患者を被験者とした検証実験により評価した(承認番号2011-222)。その結果、PTが行うハンドリングと同様に、模擬片麻痺患者の骨盤動作の通常軌跡からの逸脱が減少したことから、ロボットによるアシストの効果を検証できた⁽²⁻³⁾。

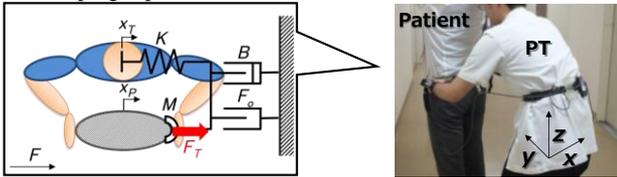
2-2 本態性振戦患者の腕のふるえを抑制する装具

日本に約400万人いると言われている本態性振戦患者のふるえの症状は、主に上肢の末端である前腕や手首に複合的に現れるとされ、食事動作や筆記動作などの日常動作に支障がある。しかし、現在の薬物療法、脳深部刺激療法、機能的電気刺激(FES)などの抑制法に侵襲性の高さや皮膚への刺激などの問題が指摘されている。そこで、装着型のふるえ抑制ロボットを用いた療法が注目されている。

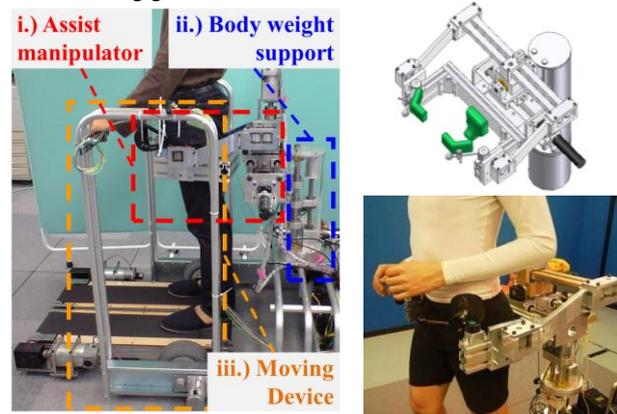
著者らは、ふるえを抑えつつ1自由度で駆動する肘装着型ロボットの開発を行っている(Fig. 2(a))。固定装具のように関節を拘束し、外部から物理的にふるえを抑制する。しかし、拘束された状態では、意図的に動作することができないため、動きの大きい肘関節に関しては患者が随意動作を行いたいときには筋電位からそのタイミングを見極め、アームを駆動することによりふるえの抑制と意図した動作の遂行を支援する(Fig. 2(b))。これまで、ふるえを抑制することに関しては、ふるえを抑制するために最低限モータに要求されるトルクの導出やロボットを装着することによるふるえの抑制効果を検証してきた。また、ふるえの信号を含んだ筋電位から随意動作意図を推定するアルゴリズム



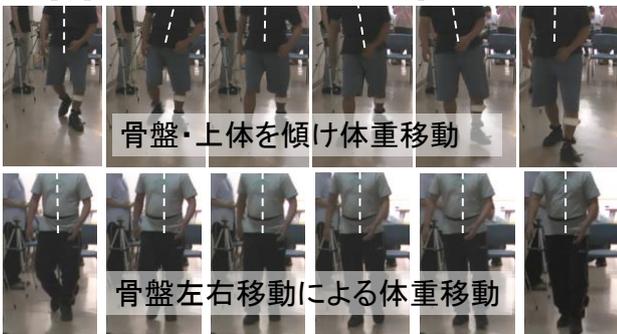
(a) Experimental scene during measurement of physical therapist's pelvic manual assist motion (force and position) to hemiplegic patients



(b) A mechanical model of interaction between physical therapist and hemiplegic patient for assist of lateral pelvic motion during gait rehabilitation



(c) A gait training robot to assist lateral pelvic motion based on a proposed mechanical model by manipulator



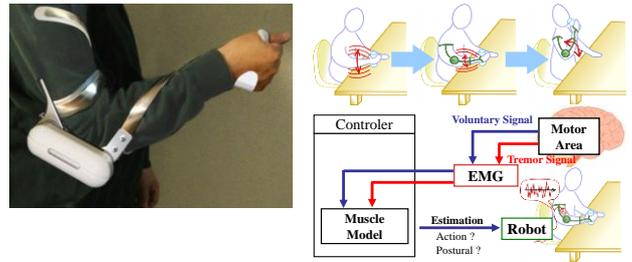
(d) Individual difference of hemiplegic patient during gait cycle

Fig. 1 Study on robot of gait training assisted by physical therapist for hemiplegic patients

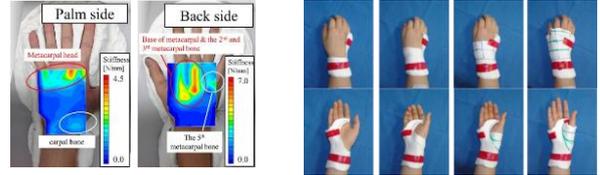
ムの検討を行っている⁽⁴⁾。

しかし、このロボット装具は、ふるえの信号をバンドを用いて上腕と前腕に固定しているが、固定に適している部位が工学的に決定されていない問題や、筋肉の収縮により装具がずれ前腕回旋動作のふるえが抑制できない問題が挙げられる。そこで、本研究では前腕回旋動作のふるえを抑制可能なフレームの通過点を工学的に決定することを目的とした。

研究手法として、神経や血管走行などの拘束に危険な部位を避けた上で、関節拘束のための筋肉や骨、痛みなどの重要な検討項目を検討し、さらに実験で硬さを取得しマッピングを作成した (Fig. 2 (c)) (承認番号 2012-245)⁽⁵⁾。



(a) Exoskeleton for essential tremor patients (b) Concept of suppression essential tremor



(c) Experimental results of stiffness mapping (d) Condition of experimental orthosis based on stiffness mapping

Fig. 2 Study on constraining forearm based on physical property measurement for tremor constraining robot orthosis

最後に、マッピングに基づき拘束に適した部位を選出し、提案した拘束手法の妥当性を検証した (Fig. 2 (d))。

硬さを取得する実験結果より、手掌における硬い部位は中手骨末端、手根骨であることが分かった。考察として、骨に近い部位は関節可動域が制限できると考えられる。

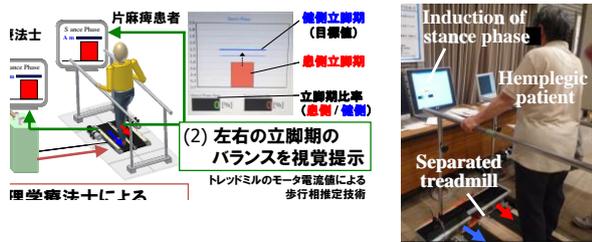
検証実験は、若年健常者被験者3名に対し、意図的に前腕回旋動作をする状態で行った。前述の実験により取得した硬い部位と柔らかい部位を、プローブを用いて拘束し、前腕の拘束力を比較した。その結果、硬い部位を拘束した方が前腕の回旋動作が減少したため、手部において硬い部位を拘束することが前腕の回旋動作抑制に有効であることが示唆された。

2-3 片麻痺歩行の左右非対称性を緩和する訓練システム

片麻痺患者の歩行再獲得のために、体重支持の訓練を歩行中に行う手法は歩行再獲得の効率が良いと言われている。患者の歩行中にPTが手技により患側の立脚期を増加させ、患側の体重支持能力を促進させるリハビリが行われている。しかし、このリハビリ手法は、PTの身体的負担だけでなく、患者にとっても自身の立脚期把握が難しいため、PTの指導には熟練を要する。これらの負担を軽減するため、本研究では立脚期を対称化するリハビリ支援ロボットの開発を目的とした。本研究にて開発したリハビリ支援ロボットでは、左右分離型トレッドミル上を患者が歩行し、その際の両側の立脚期をリアルタイムに計測して視覚的に提示し患者へのバイオフィードバックを行うことで立脚期の対称化を促す。さらに、提示された立脚期を利用し、PTがトレッドミルの左右ベルトに速度差を設定することで、患側立脚期を増加させ立脚期を対称化する (Fig. 3 (a))。

本研究では、まず、トレッドミルベルト駆動用DCモータの電流値から立脚期を計測する方法を新たに開発した。これは機器の装着なしに立脚期を計測可能な方法であり、使用時の手間を軽減できる。電流値による計測方法は、フットスイッチと同程度以上の精度で立脚期を計測可能であり、一般的な歩容を呈した健常被験者5名中4名において床反力計との誤差 0.2[s]以下の精度で計測が可能であった⁽⁶⁾。

次に、トレッドミルの左右のベルト速度差による立脚期



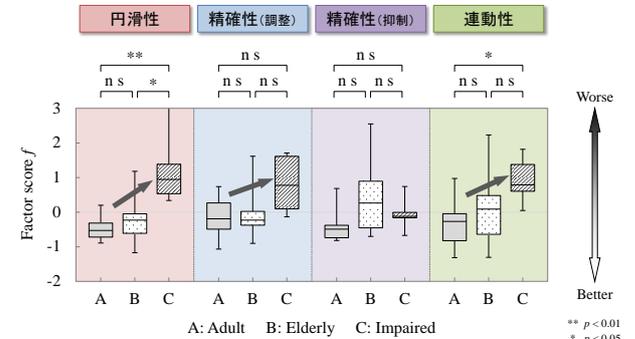
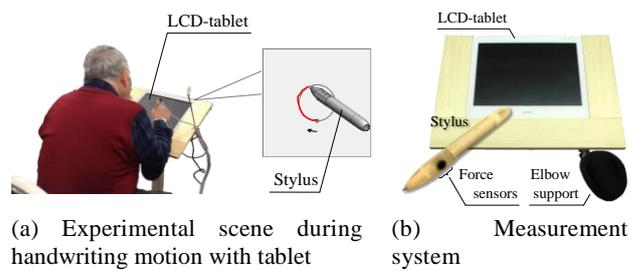
(a) Overview of feedback training system
 Fig. 3 Study on split belt treadmill based gait rehabilitation system for symmetric stroke gait
 (b) Experimental scene

の変化を模擬患者により検証した。その結果、患側ベルトを減速することで模擬患側立脚期の増加が確認された。さらに、立脚期提示の効果を模擬患者で検証した。その結果、立脚期を提示することで患側立脚期が増加し、立脚期の対称化が確認された。最後に維持期の片麻痺患者 10 名に対して立脚期のリアルタイム提示と左右ベルトの速度差を適用した場合、立脚期の変化を計測し、立脚期対称化の効果を検証した (Fig. 3 (b)) (承認番号 2009-082)。その結果、立脚期提示とベルト速度差を適用することで、患側立脚期が短く非対称な歩行を呈していた被験者 5 名のうち 3 名で立脚期の対称化が確認された。また、適用前と適用後の歩行の立脚期を比較したところ、対称化が生じた 3 名中 2 名で患側立脚期の有意な増加が見られた。この結果から、本ロボットでベルト速度差と立脚期提示を適用すると、適用した歩行中に患側立脚期が増加し、立脚期の対称化が生じることが確認できた⁽⁷⁾。また短期介入であっても本ロボットを用いることで、患者が患脚で体重を支持する歩行を意識し、実際に患側立脚期が増加する可能性が示された。

2-4 筆記動作による手指巧緻性の定量化システム

加齢や中枢性麻痺を原因とした手指巧緻動作障害に対するリハビリにおいて、リハビリ手法や機器の選択、治療効果の判定を簡便かつミスなく行うために、手指巧緻性を定量的に評価する必要がある。従来は主に、動作に要した時間のみで手指巧緻性が評価されてきた。他方、手指巧緻性は「素早さ」「精確さ」「滑らかさ」など様々な要素から構成されるという知見があるが、明確な定義は存在しない。したがって現状では、手指巧緻性の評価項目が不明確であり、定量的な評価もされていない。そこで、手指巧緻性を構成する要素を解明するとともに、それぞれの要素を定量化することを本研究の目的とした。

手指巧緻性の構成要素は、種々の物理パラメータをそれぞれの相関に応じて群分けすることで、各パラメータに影響を与える潜在的構造として解明できると考えた。そこでまず、手指巧緻性に関連するパラメータを取得するために、筆記動作計測実験を行った (Fig. 4 (a))。次に、解析したパラメータ群に対して因子分析を行い、手指巧緻性の潜在的構造の解明を試みた。筆記動作計測実験では、図形のなぞりをタスクとし、成人健常者 16 名、高齢健常者 10 名、手指巧緻動作障害者 6 名で行った (Fig. 4 (b)) (承認番号 2013-202)。評価パラメータは、遂行時間、最大速度、軌跡のずれ量など、計 12 項目とした。評価パラメータ群に対する因子分析の結果、4 つの因子が抽出された。各因子は、構成するパラメータの特徴から、『円滑性』『精確性 (調整能力)』『精確性 (抑制能力)』『運動性』という因子であると考えられた。最後に、因子得点を算出した結果、『円滑性』『精確性 (調整能力)』『運動性』の 3 因子において、障害

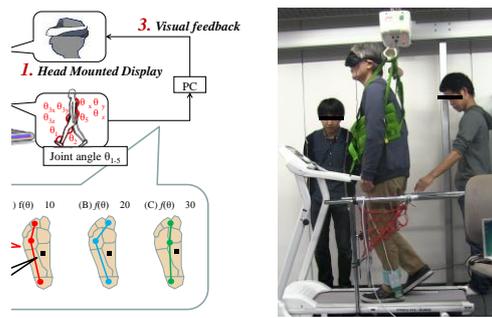


(c) Comparison of factor scores between adult and elderly, impaired subject
 Fig. 4 Study on quantitative evaluation of finger dexterity based on factor analysis of handwriting motion

者の因子得点は大きい (成績が悪い) 傾向が見られ、因子得点が障害の内容を適切に表していることが示唆された (Fig. 4 (c))。以上により、手指巧緻性の評価項目を客観的に決定し、因子得点による定量化手法の有用性を示した⁽⁸⁾。

2-5 高齢者の歩行バランス能力訓練システム

介護者に対する被介護者の増加が社会問題となっており、その要因の一つとして高齢者の転倒の増加がある。そこで本研究の目的は転倒防止のためのバランス能力訓練システムの開発とした。歩行時のバランス能力を効率的に向上させるためには、動的な訓練であることと、体性感覚に特化した訓練であることが有用である。そのため、歩行訓練中に外界の視覚情報を遮断し、更に体性感覚情報を視覚フィードバックすることで、バランス能力が大きく向上するシステムを開発した。フィードバックする体性感覚情報は、歩行中に用いている体性感覚情報である足圧分布情報と全身の関節角度情報とした (Fig. 5 (a))。本システムを製作する上での技術課題として、視覚フィードバックする際の呈示方法の選定がある。そこで本研究では、「足圧情報と関節情報の「組み合わせ」を呈示すると、訓練効果が向上する」という仮説を立てた。具体的な呈示情報としては、足圧中心点 (以下、CoP) と、各関節角度から導出した理想 CoP 軌跡 (折れ線) を用いた。理想 CoP 軌跡は踵部分、中足骨部分、つま先部分を繋ぐような折れ線の形で呈示し、中足骨部分とつま先部分の横方向の座標を変更することで 10 歩行周期ごとに更新する。以上の仮説を検証するため、フィードバックシステムを有する実機を製作して検証実験を行った。フィードバックシステムの製作にあたり、若年健常者の歩行データ (足圧分布、関節角度) を重回帰分析することで、全身の各関節角度と理想的な CoP 軌跡の関係式を導出した。高齢者を対象とした検証実験においては、フィードバックシステムを用いた訓練と、システム用いずに視覚遮断状態での訓練との比較をした (Fig. 5 (b)) (承認番号 2014-167)。バランス能力の評価指標は、CoP 軌跡の左右方向の標準偏差 σ を用いた。 σ は動的バランス能力の



(a) Overview of feedback training system

(b) Experimental scene

Fig. 5 Study on walking balance training device for the elderly persons with visual feedback system using foot pressure and posture information

低さを表している。結果として、フィードバック訓練によって σ は0.61倍になり、有意な減少となった。視覚遮断訓練後には σ は0.84倍となった。この2訓練の効果には優位($p < 0.05$)な差が見られ、開発したフィードバックシステムを行うことで動的バランス能力が向上することが示された⁽⁹⁾。

3. 実用化に向けて実施すべき課題

PTの介助動作を再現する歩行訓練ロボットでは、個人差が大きくより重度な片麻痺症状への適用や自動制御パラメータの決定手法の構築、ロボット自体が持つ粘性の影響を補正する制御手法の構築を行う。本態性振戦患者の腕のふるえを抑制する装具では、硬さの分布に個人差があったため、被験者を増やして個人差の原因を追究する。また、本研究で導出した拘束部位を通過するスプライン曲線を利用し、ロボット装具フレームの開発を行う。片麻痺歩行の左右非対称性を緩和する訓練システムでは、回復期の患者での長期的な訓練効果の確認、および速度差の自動設定方法の開発が挙げられる。筆記動作による手指巧緻性の定量化システム評価では、タスクの種類の影響や因子分析以外のモデルの適用性を検討することが課題となる。高齢者の歩行バランス能力訓練システムでは、数ヶ月、数年単位の長期的な訓練効果を検証するとともに、取得情報のスコア化を図るなど訓練意欲に対する改良を検証する。

上記の通り、いずれの研究においても、①患者の個人差に適応可能であること、②長期の訓練効果の検証が含まれる。①では、患者の特性をモデル化し、その個人差を物理パラメータとして表す手法にこれまで取り組んできたが、そのベースとなるモデル式に患者の特性をどれくらい反映できるかが重要であることがこれまでの実証実験を通してわかった (Fig. 1 (d))。患者を対象とした計測には制限があるため、模擬患者での実験の位置づけを十分検討し、機械工学の研究者の立場の意見だけでなく、医療や介護福祉従事者などの専門家との議論を絶えず交換しながら、実際の患者を対象とした評価実験に活かすことが重要であると考えられる。そこで、②では、シングルケーススタディなど、単一の症例で長期の効果を検証することが重要である。これは、①とも関係し、長期の実験の中でその患者自身の特性であるか、そうでないかを見極めることが可能であり、その他の実験に活かす貴重な知見となりえる。

4. 結言

医療福祉の分野で実用化に向けた研究を行うためには、機械工学の研究者の立場の意見だけでなく、医療や介護福

祉従事者などの専門家との議論を通じた取り組みが重要である。これまで著者らは理学療法士の介助動作を再現する歩行訓練ロボットや本態性振戦患者の腕のふるえを抑制する装具などの研究を病院の医師や施設の専門家と共同で取り組んできている。その中で、患者の個人差に適応可能であること、長期の訓練効果の検証の二点が重要であると報告した。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科研費基盤研究 A (26242061, 23240088, 20240058) 若手研究 B (15K16397, 25750257)、公益財団法人ミズノスポーツ振興財団の支援を受けて行なわれた。

参考文献

- (1) Takao Watanabe, Kazuya Kawamura, Jun Inoue, Yasutaka Nakashima, Masakatsu G. Fujie, Analysis of Interaction between Therapist and Hemiplegic Patient for Control of Lateral Pelvic Motion during Robotic Gait Training, Proceedings of the 2013 IEEE International Conference of the Robotics and Automation, pp. 2648-2653, 2013.
- (2) 中島康貴, 渡邊峰生, 東野達也, 井上淳, 川村和也, 貴嶋芳文, 東祐二, 湯地忠彦, 藤元登四郎, 藤江正克, 片麻痺患者の歩行訓練支援に向けた理学療法士の介助動作を再現するロボットの開発, 第18回ロボティクスシンポジウム, pp. 1-8, 2013.
- (3) 中島康貴, 渡邊峰生, 井上淳, 川村和也, 藤江正克, 理学療法士の介助動作を規範とする歩行訓練ロボットのためのハンドリング動作の力学的モデルの構築, バイオメカニズム, vol. 22, pp. 237-248, 2014.
- (4) Yuya Matsumoto, Masatoshi Seki, Takeshi Ando, Yo Kobayashi, Yasutaka Nakashima, Hiroshi Iijima, Masanori Nagaoka, Masakatsu G. Fujie, Development of an Exoskeleton to Support Eating Movement in Patients with Essential Tremor, Journal of Robotic and Mechatronics, vol. 25, no. 6, pp. 949-958, 2013.
- (5) 松本侑也, 陳瑋煒, 金石大祐, 雨宮元之, 中島康貴, 小林洋, 關雅俊, 安藤健, 飯島浩, 長岡正範, 藤江正克, ふるえを抑制する装着型ロボットのフレーム形状の工学的検討, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2013, GS3-1-10, 2013.
- (6) Takeshi Ando, Eiichi Ohki, Yasutaka Nakashima, Yutaka Akita, Hiroshi Iijima, Osamu Tanaka, Masakatsu G. Fujie, A Gait Phase Measurement System using Treadmill Motor Current, Advanced Robotics, vol. 26, no. 13, pp. 1727-1746, 2012.
- (7) 安藤健, 大木英一, 中島康貴, 秋田裕, 飯島浩, 田中理, 藤江正克, 左右分離型トレッドミルを用いた歩行相フィードバックシステム, 日本機械学会論文集C編, vol. 77, no. 783, pp. 4189-4203, 2011.
- (8) 中島康貴, 望月孝太, 三浦智, 松本侑也, 小林洋, 渡邊慎一, 西則彦, 飯島浩, 藤江正克, 手指巧緻性の定量化に向けた筆記動作の因子分析, 第32回日本ロボット学会学術講演会, 2Q2-01, 2014.
- (9) 中島康貴, 滝澤和弥, 松本侑也, 三浦智, 小林洋, 藤江正克, 足圧と姿勢情報の視覚バイオフィードバックを用いた 高齢者の歩行時バランス能力訓練装置の開発, 日本機械学会2015年度年次大会, 2015.