

トピック記事『リハビリテーションと工学連携の実践』

執筆者

県立広島大学保健福祉学部理学療法学科

助産学専攻科（兼務）

教授 島谷 康司

横浜国立大学大学院工学研究院

知的構造の創生部門

准教授 島 圭介

1. はじめに

厚生労働省は2018年4月の介護報酬改定で、介護予防ロボット“見守りセンサー”をはじめ報酬の評価対象とし、導入した特別養護老人ホームに対して報酬加算が得られるという方針を打ち出した（朝日新聞，2017.11.30）。近年，センシング技術やコンピューター技術の向上，機械の小型化などにより，歩行訓練ロボットや日常生活を支援するロボットなどが医療・介護分野で実用化に向けて開発がすすめられている。

本稿では，筆者らが研究に取り組んでいる高齢者の転倒予防，運動麻痺者に対する運動療法，子どもの歩行の発達支援，発達障害児の行動評価について，リハビリテーションと工学連携の実践として筆者の自験例を述べてみたい。

2. 転倒予防に対する仮想壁を利用した立位機能評価システムの開発

日本の65歳以上の高齢者人口が総人口に占める割合は25.1%（平成26年）であり，今後も年々上昇すると予想されている。高齢者が抱えるリスクである転倒・転落は，介護が必要となる要因として第4位（平成25年）である。高齢になるにつれて転倒が介護要因に占める割合が増加していることから，高齢者に対する転倒予防法の確立が必要不可欠である。

転倒を本質的に予防するためには，被験者毎に異なる転倒要因の解明や立位・歩行に関する運動機能の正確な評価を実施することが必要と考えられる。例えば従来，高齢者の転倒の状況や頻度に着目した転倒因子の調査（W.C.Graafmans 1996, N. Niino 2000）や，歩行や立ち上がり動作などのテストを行わせて転倒要因について調査する試み（A. Bergland 2004）などが行われている。また，転倒因子の一つであるつまずきの状態をトレッドミルにて再現・計測し，転倒にかかわる筋の反応などの評価などが行われている（大淵修一 2003）。しかし，これらは検査項目が多岐であることや，つまずきや転倒を模擬する刺激が被験者への負担となる可能性が考えられるため，被験者に大きな負荷をかけずに簡易的・定量的に立位機能評価を行うことが必要であると考えられる。

我々は，ヒトの周りに仮想的な壁（仮想壁）を構成し，壁に触れた反力を振動刺激として

指先に与えることによって姿勢保持の支援を行う，仮想ライトタッチコンタクト（VLTC：Virtual Light Touch Contact）システムを提案してきた。VLTCはヒトが壁やカーテンなどに軽く触れることで姿勢動揺が減少するライトタッチコンタクトという現象を世界で初めて仮想的に再現したものである。我々の提案している VLTC システムでは，指先への体性感覚刺激を利用して被験者の姿勢動揺を誘発させ，立位時の身体機能と外乱刺激に対する反応と姿勢動揺の変化から立位機能を評価しようとするものである。具体的には，提案システムでは計測中に被験者の身体の周りに仮想インピーダンス壁(仮想壁)を構成し，仮想壁からの仮想反力の提示状態を無作為に変化させることによって被験者に外乱刺激を与え，仮想反力の変化に伴う立位状態の変化を定量的に計測・評価する。評価結果は計測後にレーダーチャートとして提示することで，単純な重心動揺検査では評価できない体性感覚刺激の有無によって生じる立位姿勢の変化に基づいて立位機能を定量化できる可能性がある。

実験では，健常若年成人と高齢者を対象に，KINECT for Windows, Nintendo Wii, 小型加速度計と振動子によって構成された VLTC システムを用い，閉眼閉脚立位を 60 秒間保持させ計測した。なお，VLTC を実施時には本人の快適なリズムで手を振らせた。結果，各評価指標値に関して標準化を行った場合は，開眼・閉眼両状態において若年成人は平均値に近く真円に近いチャートの傾向が得られているのに対し，高齢者は各指標値が大きく，チャート形状が歪んでいる。このことから，高齢者に関しては姿勢動揺を誘発させた場合には若年者よりも身体動揺が大きいことが示唆され，これらをレーダーチャートの形状や大きさから評価可能なことがわかる。また，開眼時と閉眼時の指標値差においても，若年成人と高齢者では大きく差がみられる。これは，高齢者は閉眼時に開眼時よりも姿勢動揺が大きくなり，若年成人はその傾向が小さいことを意味する。そして，全評価指標の絶対値総和を用いて比較した場合には，両条件において若年成人と高齢者間で有意差が認められており，被験者の立位機能を定量的に評価できるインデックスとして提案法を使用できる可能性が示唆された。

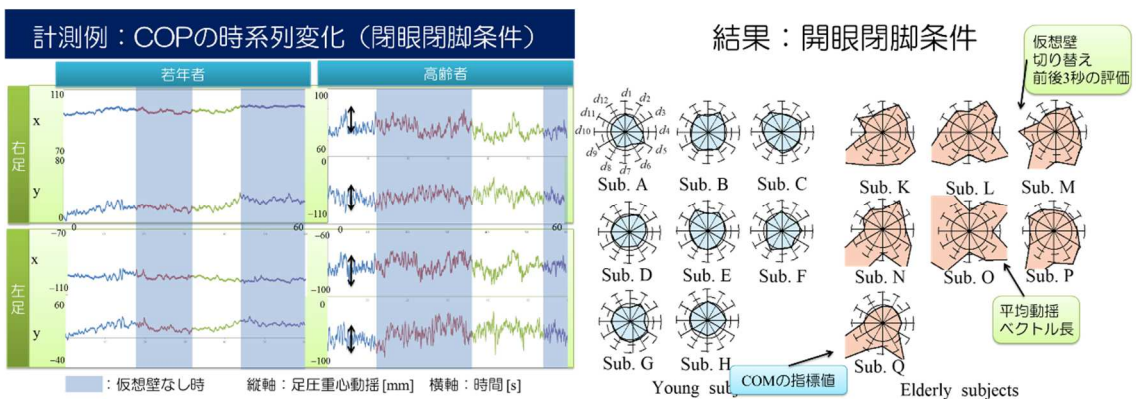
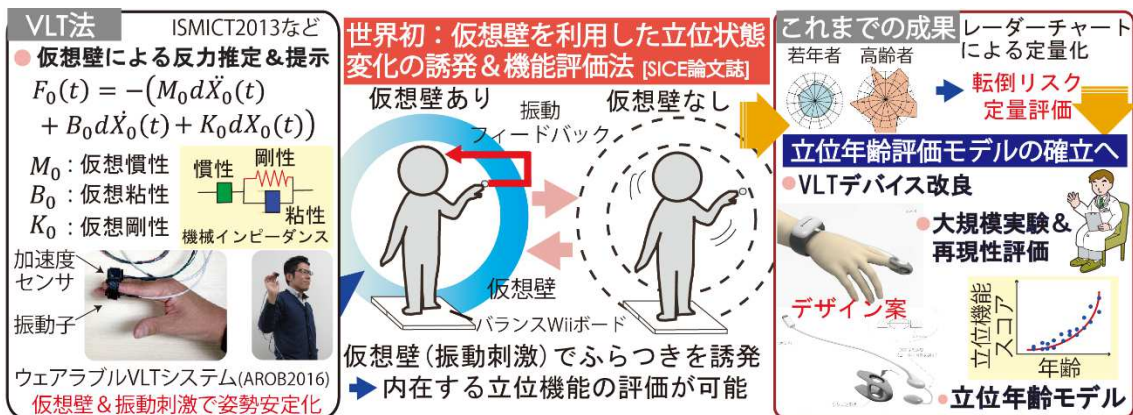


図 1 仮想壁を利用した立位状態の変化の誘発とレーダーチャートによる立位機能の定量化を行い、工学連携によって転倒リスクの定量的評価と立位年齢モデルを確立するために追究している。

### 謝辞

本研究は、平成 28～31 年度 文部科学省科学研究費補助金 若手研究 A 仮想壁で転倒リスクを見える化:立位・感覚重みインピーダンスの提案と立位機能評価(代表:島圭介)、平成 29～31 年度 公益財団法人セコム科学技術振興財団 特定領域研究助成 社会技術分野 領域名:人間情報・社会情報に基づく安全安心技術の社会実装 安心安全かつ自律した労働と生活を保証する「社会・労働参画寿命」の見える化と訓練法(代表:島圭介、分担研究:島谷康司、泉博之)の助成を受けたものです。この場をかりて御礼申し上げます。

### 3. 機能的電気刺激と動作推定に基づく筋電位駆動型ヒューマンヒューマンインタフェースの開発

理学療法士は患者の残存する筋収縮や関節可動域などを適切に評価して目的的运动に必要な筋収縮の状態を患者に指示し、患者の随意運動の意思を正確に読み取って適切に介助

することなどが求められる。ただし、これらの評価、指示、介助は口頭指示による伝達を実施するか、あるいは患者の筋付近の皮膚への促通手技・タッピング手技等によって行う必要があり、客観的かつ定量的な実施が困難であるという問題がある。そのため、リハビリテーションにおいて患者と療法士双方の情報伝達を円滑にし、運動学習を支援できる方法論の確立が必要である。我々は、適切な筋収縮状態、力情報、タイミングを療法士と患者間で相互伝達可能とし、運動学習を効果的に支援する方法を確立することを目的にリハビリテーションと工学連携を行っている。

従来、目的の筋へ機能的電気刺激を与えることで筋収縮をコントロールして動作の再現が可能であることや、適切な筋収縮を促してタイミングよく関節運動を誘発させることで身体機能の再獲得が期待できる。我々はこの機能的電気刺激に注目し、機能的電気刺激と動作推定を組み合わせた2者間の動作伝達法（状態遷移モデルと電流-関節角度モデルを導入した動的な動作伝達法）を提案し、リハビリテーションへの適用可能性を検討している。つまり本提案は、電気刺激と動作推定を組み合わせたヒューマンヒューマンインタフェースであり、セラピストの動作を患者に伝達して動作学習を支援するだけでなく、患者の動作をセラピストに伝達し、例えば脳卒中片麻痺患者の共同運動パターンによる肩関節屈曲運動をセラピストが直感的に感じることができると想定している。

物体の把持や運搬などの動的な動作の課題に対し、提案システムでは動作伝達者の90%を超える平均識別率が得られ、また物体を把持して移動させるなどの複雑なタスクが人から人へ伝達可能であり、今後は様々なタスクの伝達へ応用できる可能性が示された。

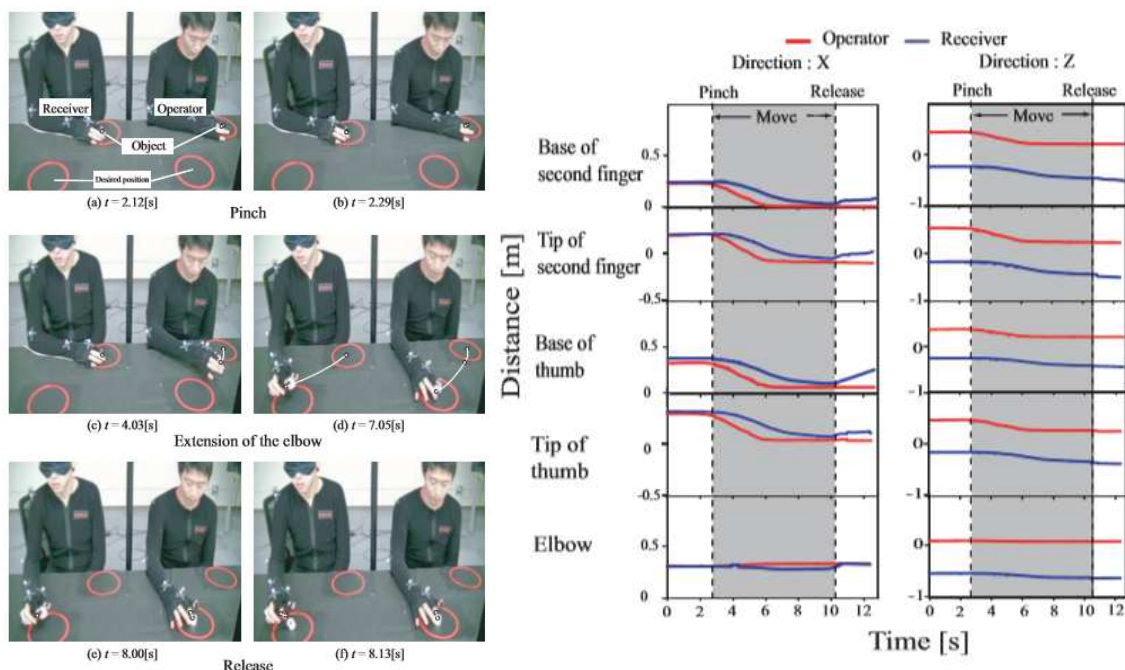


図2 両被験者のマーカを付けた部位の座標を表したものであり、物体把持と移動タスクの伝達実験の結果をx軸方向とz軸方向の原点からの距離を表したものである。両被験者の様子を比較すると、両者は同じ特徴を示していることが読み取れる。伝達者が物体を把持して腕を伸展させ、物体を正面の円内へ移動させると、時間差はあるものの受信者も同様に物体の把持と移動が実現できている。注：Operator（伝達者）、Receiver（受信者）

## 謝辞

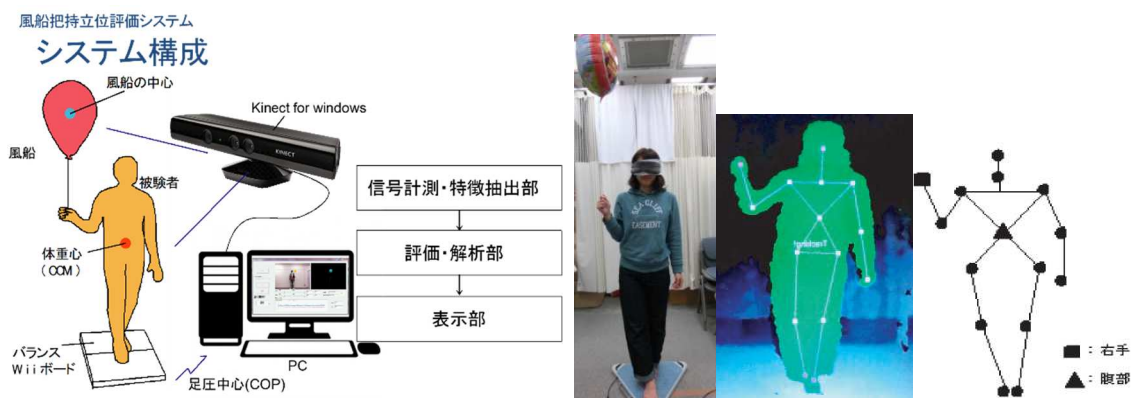
本研究は、平成 26～30 年度 文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究 脳内身体表現の変容機構の理解と制御（代表：太田順）において、平成 27～28 年度 公募型研究Ⅰ期 C03-2 動作推定と機能的電気刺激に基づく筋協調制御能力獲得型ダイレクトリハビリテーション（代表：島圭介，連携研究：島谷康司ほか），平成 29～30 年度 公募型研究Ⅱ期 C03-2 筋協調制御型ダイレクトリハビリテーションによるスキル訓練と身体／脳機能変容の解析（代表：島圭介，連携研究：島谷康司ほか）の助成を受けたものです。この場をかりて御礼申し上げます。

## 4. 風船把持による乳幼児歩行支援システムの開発

健やかな発達を促すために養育者による保育実践が展開されてはいるものの、初期歩行の遅れや不安定な歩行を呈する乳幼児の相談が増え、より具体的な対策が望まれている。しかし現状では、初期歩行発達遅延の確立した支援方法はない。我々は、初期歩行後早期の乳児に風船付きの紐を把持させると歩行が安定し、歩行距離が延長することに気付いた。このことは、初期歩行期における乳幼児の新しい歩行支援方法の可能性を示唆している。我々は、静止立位時の風船把持の影響について健常若年成人を対象に身体動揺検査およびコンピューターシミュレーションを用いて検証している。

実験では、何も把持しない **No Contact** 条件（以下、**NC** 条件）、風船を右手で把持する条件（以下、**BL** 条件）の 2 条件を設定し、被験者ごとにランダム化して計測を行い、60 秒間の計測データを比較した。測定肢位は利き足を前に出して踵とつま先を接地させるタンDEM立位とした。総軌跡長（以下、**LNG**）、実効値面積（以下、**RMS**）、左右軌跡長、前後軌跡長の項目それぞれについて、**NC** 条件と **BL** 条件の 2 群間で対応のある **t** 検定を行った。また、身体的位置関係については右手部と体幹部を指標として、**NC** 条件と **BL** 条件を一元配置分散分析および **Tukey** の多重比較検定にて処理を行った。重心動揺計測の結果、**NC** 条件と **BL** 条件を比較したところ総軌跡長 ( $p<0.01$ )、左右軌跡長 ( $p<0.01$ )、前後軌跡長 ( $p<0.01$ )、**RMS** ( $P<0.05$ ) で有意差を認めた。**KINECT** 動画による各身体部位の位置情報から、**NC** 条件と **BL** 条件の右手部と体幹部の **RMS** について群間比較した結果、右手部間・体幹部間の両部位に有意差は認められなかった。これらのことから、健常成人の静止立位においても風船把持によって重心動揺が減少することが明らかとなった。神崎ら(2010)は指先触覚が身体と環境との定位に関する求心性情報となり、中枢神経系を介して姿勢制御に寄与していると述べている。また、ヒトの姿勢制御は、フィードバック制御とフィードフォワード制御の両方の形で行われ、様々な環境において平衡を保持しているとも述べている。今回の実験では、風船の紐を把持することで、浮遊する風船付きの紐からの触・圧覚や、指先から上肢にかけての固有受容感覚といった体性感覚情報のフィードバック量

が増大し、指、手、腕、体幹部などの各身体部位と外界との相対的な位置関係を知覚することで、姿勢コントロールに働くと考えていた。しかし、KINECT データより風船を把持している右手部と腹部の RMS について比較を行った結果、NC 条件と BL 条件の右手部と体幹部の両部位の RMS にそれぞれ有意差は認められなかった。つまり、風船を把持した右手部と体幹部の位置関係には NC 条件と BL 条件では、想定したほど大きな違いがないことが明らかとなった。ヒトの身体重心位置の動きと身体部位の左右、前後の動きには相関があり、立位時には各身体部位を前後、左右に微妙に動かしながらバランスをとっていると示していることが報告されている(1993)。本研究では、実際に風船条件では重心動揺が減少していること、風船把持という条件以外に実験条件に違いがないことから、風船を把持した紐を基準として、姿勢制御を行うなど、風船が何らかの影響を及ぼしている可能性が高いことが分かる。そのため、現在、風船の挙動も含め、コンピューターシミュレーションを用いて風船把持が姿勢制御に与える影響について検証している。



風船把持立位の解析方法

### 筋骨格モデルを用いた逆動力学解析

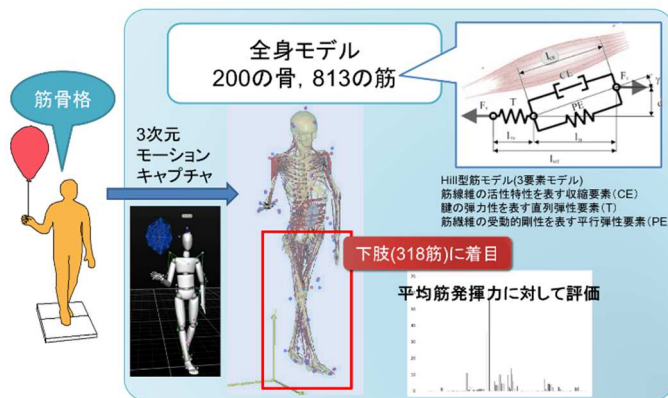


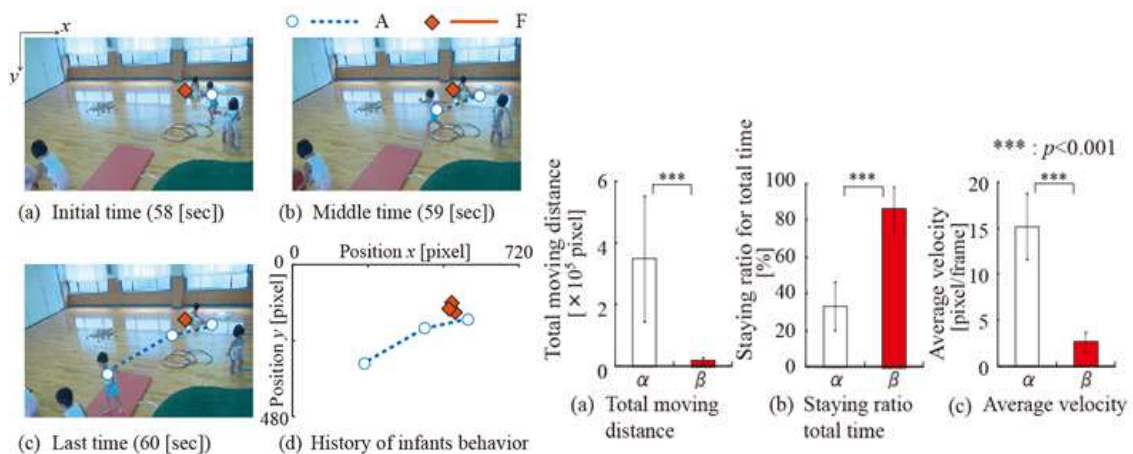
図3 風船把持立位評価システムとして、KINECT for Windows, 重心動揺検査機器, PC と工学連携によって作成した評価プログラムを使用している。また、現在は予測不可能な挙動をもつ風船をトラッキングし、筋骨格モデルを用いて逆動力学解析を行い、風船把持による姿勢制御への力学的影響を検証している。

## 謝辞

本研究は、平成 25～27 年度 文部科学省科学研究費補助金 挑戦的萌芽研究 風船把持が歩行獲得を促す-初期歩行遅延に対する新しい歩行支援システムの提案-（代表：島谷康司，分担研究：島圭介），平成 28～30 年度 文部科学省科学研究費補助金 挑戦的萌芽研究 風船把持歩行の効果の謎に迫る：指先感覚情報の“揺らぎ”解析と風船型姿勢制御モデル（代表：島谷康司，分担研究：島圭介）の助成を受けたものです。この場をかりて御礼申し上げます。

## 5. 発達障害児の集団内における行動評価

発達障害児が障害物に接触する原因を明らかにすることを目的として 5 つの検証を行った。その結果、発達障害児は身体をぶつけることが多く、その原因の 1 つとして運動の見積もり能力に問題があることが明らかとなった。この見積もり能力は、身体図式に依存して正確性が決定されるため、発達障害児が障害物を回避するためには身体図式を発達させるようなさまざまな運動経験が重要であることを証明した。次に発達障害児の個々の障害特性を客観的に評価する方法を検証した。注意機能や粗大運動など様々な角度から検証し、仮想環境下でゲーム性を持たせた評価システムを提案し、上肢と下肢を用いた運動反応を評価指標として用いることによって、注意機能や運動機能をより詳細に評価できることを新たに証明した。落ち着きがなく注意散漫で、集団遊びを苦手とする発達障害の症状が幼児の社会生活を困難にしている。しかし、これらの評価は個々人に対する個別評価であり、集団内で発達障害の症状を定量的に評価する方法は無い。本研究では、集団行動をマーカーレスで定量化して幼児の行動モデルを構築し、発達障害の行動評価システムを提案している。本提案を実現するためには、①リアルタイムで画像処理を行い、長時間にわたる連続計測の実現、②幼児の自然な行動を計測し、集団内の幼児をマーカーレスで同時に解析できる、③行動の特徴・障害発見の基準となる評価指標を自動的に算出・表示できる、④



幼児の行動評価結果や解析動画をデータベースから参照できることが必要となる。現在、

①市販されているデジタルビデオカメラ 4 台を使用して複数の幼児をマーカーレスで同時計測・解析し，②計測した動画像や評価結果などの表示方法の確立と③データベースへの保存処理方法を確立し，④発達障害の症状の定量化を実現するためのシステムの構築を目指している。

#### 謝辞

本研究は，平成 19～20 年度平 文部科学省科学研究費補助金 若手スタートアップ 軽度発達障害児の自己身体知覚の検証（代表：島谷康司），平成 22～24 年度 文部科学省科学研究費補助金 若手研究 B 仮想環境システムを用いた軽度発達障害児の身体特性評価-危険回避能力を検証する-（代表：島谷康司），平成 26～30 年度 文部科学省科学研究費補助金 基盤研究（B）（一般）集団における発達障害の症状を定量的に評価する -発達障がい行動モデルを用いた新たな評価支援システムの提案-（代表：島谷康司，分担：島圭介）の助成を受けたものです。この場をかりて御礼申し上げます。

#### 6. 結びに変えて

本稿では，高齢者の転倒予防，運動麻痺者に対する運動療法，子どもの歩行の発達支援，発達障害児の行動評価について，リハビリテーションと工学連携の実践として筆者の自験例を述べた。

2020 年東京オリンピック・パラリンピック競技大会開幕まであと 1000 日をきり，競技選手の身体機能・技能向上のサポートや義肢装具や車椅子などの競技用器具のフィッティング，さらにはオリンピック開催中の競技選手の生活のサポートを含め理学療法士が活躍できる機会も多く，期待もされている。また，スポーツを現代のテクノロジーと一体化することによって実現する“超人スポーツ”が創造されている。超人スポーツ学術研究会のホームページによると，『人間の身体能力を補綴・拡張する人間拡張工学に基づき，人の身体能力を超える力を身につけ「人を超える」，あるいは年齢や障碍などの身体差により生じる「人と人のバリアを超える」，そのような超人（Superhuman）としてフィールドで競う，「人機一体」のスポーツ』であり，ヒトの発達や加齢変化，各種疾患の身体・精神機能の特徴を熟知している理学療法士こそこの分野でも新たに活躍できる可能性を秘めていると考える。様々な分野で理学療法士が工学と連携し，新たなイノベーションを創造することができる。と私は信じている。