

氏名（本籍）	坂東 直行（愛知県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第 373 号
学位授与日付	平成 21 年 9 月 9 日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	人の運動特性の工学的解析に基づく身体移動支援機器の開発 (Development of assist machines based on technological analysis of human motion characteristic)
学位論文審査委員	(主査) 川崎 晴久 (副査) 山本 秀彦 山田 宏尚

## 論文内容の要旨

人体に備わった機能を解明しようとする試みは、古くから現在に至るまで人が大きな関心と興味を示す事柄のひとつであり、解明された機能や特性に関する知見は人を支援する機器の開発に役立てられている。本研究においても人の特性を考慮したうえで、人を支援する機器の開発およびその指針を得るものであり、主に高齢者および身体障害者の生活および社会活動を支援するための機器を開発することを目的とする。高齢者においては、加齢により身体機能が低下し、日常生活動作が困難になり、そのなかでも起立動作は負担が大きいことが知られている。起立を支援する機器としては起立補助椅子があるが、従来の起立補助椅子は開発者側が十分に高齢者の起立特性を考慮できていなかった。そこで本件急では高齢者の起立特性を実験により明らかにし、起立補助椅子の開発設計の指針を得たうえで起立補助椅子の開発を行った。また身体障害者の主たる移動手段は車椅子であるが、車椅子で移動するときの環境バリアの存在がかねてから問題視されていた。これを解決するにはVRを利用して、建築物等の施工前にバリアの存在を評価するシステムが有効であると考えられるが、現実即した評価を仮想空間で行うには、現実の車椅子の挙動を評価に必要なレベルまで再現する必要がある。そこで、人の複数の感覚器に感覚情報を提示できるVR手動車椅子シミュレータを開発し、その有効性を検証した。これらの成果について、第2章から第4章までの3章構成で述べた。以下に本研究で得られた成果を各章ごとにまとめて述べる。

第2章では、車椅子ユーザにおける建築物等における環境バリアを建築物の建造前に評価することを目的第2章では、起立補助椅子を新たに提案し、開発した。はじめに、起立補助椅子の主たるユーザであると想定される高齢者の起立動作を解析するため、モーションキャプチャおよび床反力計を用いた動作測定実験をおこない、起立動作データを取得した。つぎに、身体を剛体リンクにより構成された多リンク機構と見立て、運動方程式を導出し、取得した起立動作データを入力することで、リンク接点（人体における関節）が発揮しているトルクや、身体重心位置を求め、起立動作の解析を行った。この結果、高齢者の起立動作においては、上肢の力を有効に活用するのがよいと考え、肘掛け可動機構を提案し、試作した。この肘掛け可動機構は独立して動作可能となっているため、現在市販されている起立補助椅子の機構の変更の必要なく、取り付けることができる。次に、この肘掛け可動機構の評価を行うため、高齢者を被験者として、評価実験を行ったところ、これまでの起立補助椅子では立ち上がることが困難であった人が、肘掛け可動機構を付加した起立補助椅子を用いれば立ち上がることができることを確認した。このことから、本研究で開発した起立補助椅子は、現在の起立補助椅子では立ち上がりが困難な人にとって有効であるといえる。

第3章では、起立補助椅子の座面移動にもなうユーザの姿勢変化と、その心理的評価の関係について官能検査実験および動作測定実験の結果から考察した。はじめに、座面の移動軌道が自由に設定できる評価実験機を用いて、座面軌道を5パターン設定し、これらの被験者に提示した。このとき被験者が良いと感じる座面軌道を官能検査実験により評価し、パターン間の比較を行った。この結果、座面上昇機能を機械的に実現する際に、比較的容易にできる直線移動や、並行リンクを用いた移動の場合の評価が低いことがわかった。この結果は、将来ユーザが不安感を感じずに座面を移動させるための機構を設計する際に有効であるといえる。

第5章では、車椅子ユーザにおける建築物等における環境バリアを建築物の建造前に評価することを目的に、VR手動車椅子シミュレータを提案し、開発した。はじめに、6自由度の任意の位置・姿勢をとることができるスチュワートプラットフォーム型パラレルリンク揺動装置を用いて体性感覚を提示し、ヘッドマウントディスプレイにより視覚情報を提示することができる簡易型シミュレータを構築した。このとき、ソフトウェア上で構築した仮想空間をユーザが移動するためのインタフェースとして、ハンドリム型入力装置を介して、操作情報を取得した。ユーザは、これらを用いて、仮想空間内を移動することができる。この簡易型シミュレータの評価を行うため、船舶環境における車椅子利用を想定し、評価実験を行った。この結果、揺動感覚の提示がない場合に比べて、ある場合のほうが、ユーザは、仮想空間

における自身の状態を正確に認識していることがわかった。これにより、床面が水平でない仮想空間における車いすの挙動について、ユーザにより臨場感の高い感覚を提示できる。次に、ハンドリム型入力装置に力覚提示機能を付加し、ユーザに仮想空間を移動する際の操作力を提示できるようにした。これにより、ユーザは、移動抵抗や床面の状態を把握することができる。また、ユーザに提示するための、仮想空間内において車椅子で移動する際に必要な操作力を求めるため、車椅子の運動方程式を構築した。この運動方程式では、いくつかの仮定があるものの、現実に近い操作力をユーザに提示することを可能とした。操作力を提示することによる操作者の臨場感向上を評価するため、スロープ角度に対する官能検査実験をおこなったところ、操作力のみや、体性感覚のみを提示するときよりも、両者を組み合わせたときのほうが正確に角度を推定できていることがわかった。このことから、複合的に感覚を提示することがユーザによる評価を仮想空間内で妥当性を持った評価にするために重要であるとの結論を得た。本研究で開発したシミュレータは、複合的に感覚提示を可能とするシステムであるため、車いすユーザが建築物や設備のレイアウトや機能を評価する際に有効であると考えられる。

最後の第5章では、本論文で得られた成果をまとめ、今後の課題について述べた。

### 論文審査結果の要旨

車椅子からの「移乗」、および車椅子を使った「移動」においては、それぞれ肉体的負担が大きいかかわらず、現在のところ十分に有効なシステムがなく、これらが原因で車椅子生活の質を下げる結果となっている。本研究では、これらの問題に対して、工学的な立場からの改善を目的とし、起立補助装置の開発および車椅子シミュレータの開発を行っている。起立補助装置の開発においては、起立という人の運動特性を把握したうえで設計指針の導出が要点となる。また、車椅子シミュレータの開発においては、VRを用いることが、車椅子を用いた移動における人の運動特性に与える影響を把握することが要点となる。そこで、移乗問題解決のための起立補助装置の開発においては、高齢者の起立特性を踏まえた、起立補助機構の設計指針の導出および利用者の不快感の少ない起立補助機構の提案を本研究の目的としている。また、移動問題解決のためのVR車椅子シミュレータの開発においては、揺動感覚を提示できるVR手動車椅子シミュレータの開発および提案したシミュレータの効果の評価を本研究の目的としている。

本研究ではまず、起立補助車椅子の主たる利用者として想定される高齢者の起立特性を解析することで起立補助装置の設計指針を導出した。高齢者を被験者とし、起立動作の解析を行った結果、①高齢者と比較して、若年者は起立動作がすばやく身体全体の動きも大きいこと、②関節角度変化パターンに関して高齢者と若年者の間に大きな違いはないこと。③若年者は高齢者と比べて、起立姿勢における体重心位置が前にあること。④起立動作中においても、起立姿勢においても足首関節トルクが小さくなるように高齢者は立ち上がっていること。⑤高齢者の起立動作において肘掛は重要な機能を持ち、座面から腰を持ち上げる瞬間において、下半身の負担を軽減させるため、上半身で身体を支えていることなどが明らかになった。また、起立補助装置の座面移動にもなうユーザの姿勢変化と、その心理的評価の関係について官能検査実験および動作測定実験より考察した結果、座面上昇機能を機械的に実現する際に、比較的容易にできる直線移動や、並行リンクを用いた移動の場合の評価が低いことがわかった。この結果は、ユーザが不安感を感じずに座面を移動させるための機構を設計する際に有効であるといえる。

さらに、建造物における車椅子での利用のしやすさを、実際に建造する前に評価することを目的に、VR手動車椅子シミュレータを開発した。まず、VRシミュレータを、6自由度の任意の位置・姿勢をとることができるスチュワートプラットフォーム型パラレルリンク揺動装置、ヘッドマウントディスプレイ、車椅子の車輪型力覚提示装置およびそれらを制御するPCにより構成した。これにより、シミュレータの体験者に、揺動装置による体性感覚、ヘッドマウントディスプレイによる視覚情報、力覚提示装置による力感覚を提示することができた。次に、仮想空間内を車椅子で移動するときの操作反力を求めるため、車椅子の運動方程式を構築した。この運動方程式により現実に近い操作反力の提示が可能になった。このように構成されたシミュレータにおいて、シミュレータ体験者が、どの程度現実感を得ているかを評価するため、本シミュレータにおける感覚提示装置のすべてが動作する仮想傾斜路において、動作させる感覚提示装置の組み合わせを選択しながら、スロープ角度に対する官能検査実験をおこなった。その結果、操作反力のみや、体性感覚のみを提示するときよりも、両者を組み合わせたときのほうが正確に角度を推定できていることがわかった。このことから、シミュレータの体験者に、より質の高い現実感を提示するには、提示する感覚を複合的に組み合わせる必要がある、視覚、体性感覚、力覚を提示することのできる本システムの優位性が示された。

### 最終試験結果の要旨

最終試験においては、博士論文の内容に従い発表が行われた。論文の内容は、これまで国際会議で2件講演発表を行い、学術論文誌に4件掲載されている。博士後期課程学生としての必要な単位も修得し、公聴会での質問事項にも適切な回答をしており、学位論文の授与に値するものである。