

氏名（本籍）	齊藤 亜由子（秋田県）
専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	工博甲第 229 号
学位授与の日付	平成 28 年 9 月 27 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学資源学研究科 生産・建設工学専攻
学位論文題目（英文）	実滑走計測に基づくスキーターンのメカニズム解明に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 土岐 仁 (副査) 教授 神谷 修 (副査) 教授 三島 望 (副査) 教授 足立 高弘

論文内容の要旨

スキーは、重力を利用して広大な雪面を滑走するスポーツである。スキーにおける運動のメカニズムを解明するためには、実際の雪面を滑走するスキーヤーの運動解析や、スキー板の特性解析等を行う必要がある。スポーツの運動計測においては、ビデオカメラを用いて被験者を撮影し、映像により解析を行う DLT 法が一般的に用いられている。しかし、スキーは高速で広範囲を滑走するスポーツであるため、ビデオカメラを用いてスキーヤーを正確に撮影することは困難であり、システムが大規模かつ高コストになる等の問題が生じる。そこで、低コストであり、計測範囲に制限されずに計測が可能な、小型の慣性センサを用いた運動計測法が提案されている。センサの出力にはドリフト誤差などの誤差が含まれるが、複数のセンサを併用することにより誤差を補正するセンサ・フュージョンが提案され、スキーヤーの 3 次元姿勢を詳細に推定することが可能となった。さらに、慣性センサから得られるスキーヤーの運動情報と、GPS レシーバから得られる滑走軌跡情報を併用したセンサ・フュージョンにより、滑走速度を推定する方法が提案されている。また、複数のロードセルやひずみゲージ、6 軸力センサを用いることにより、実滑走におけるスキーヤーの操作力計測が行われ、姿勢情報や力情報からスキーヤーの運動の特徴が明らかにされつつある。加えて、スキー板やスキーブーツなど用具に関する研究や、スキー操作のモデル化に関する研究など、幅広い視点からスキーにおける運動のメカニズムを解明するための試みが行われてきた。しかし、スキーヤーがスキー板に与える操作力に対して、ど

のようにターンが行われているかは明らかにされていないのが現状である。

以上より、スキーターンにおける運動のメカニズムを解明するためには、スキーヤーの操作力とターンとの関係を定量的に示す必要がある。本論文では、スキーヤーがスキー板に与える操作力と滑走速度との関係に着目したターンモデルを構築し、実滑走情報を用いて、スキーターンを定量化するための新しい解析方法を提案した。本解析法を用いることにより、スキー板をたわませるための力やサイドカーブを使用するための力が、滑走速度に与える効果を定量的に示すことができるため、スキーヤーのスキル評価や指導法への応用が期待できる。

さらに、本論文では、計測システムの重量や、計測専用のスキーブーツ、スキー板を装着することによりスキーヤーが受ける運動の制限を低減するため、軽量な小型力センサを搭載し、個人のスキーブーツ、ビンディングに装着可能なスキー用雪面反力計測システムを提案した。また、システムの薄型化を行い、薄型化する前と、薄型化した両システムにより得られた操作力の計測結果から、ターンにおけるスキーヤーの操作力の特徴を捉え、高さの異なるシステムにおける操作力の違いを示し、その要因について分析した。

次に、本論文の構成について述べる。

第1章では、本論文の背景と目的および構成について述べている。

第2章では、実滑走における滑走速度とスキーヤーの操作力を用いたターンモデルを構築し、スキーヤーの操作力がターンに与える効果を定量的に示す解析方法を提案した。また、ターンモデルを用いて推定した滑走速度と、GPS レシーバと慣性センサ・地磁気センサを用いた滑走速度推定法により推定した滑走速度の結果を比較し、本解析方法の有効性を示した。さらに、スキー板のたわみとサイドカーブの特性を考慮した改良型ターンモデルを構築し、その有効性を示すとともに、改良型ターンモデルが改良前のターンモデルと比較して、より詳細に滑走速度とスキーヤーの操作力との関係を示すモデルであることを示した。

第3章では、小型3軸力センサを用いたスキー用雪面反力計測システムを開発した。また、これまでスキーヤーの操作力計測に用いてきた6軸力センサとの比較による検証実験を行うことにより、本システムの有効性を確認した。本システムは、6軸力センサと比較して小型・軽量であり、個人のスキーブーツ、ビンディングに装着が可能であることから、これまでの計測システムでは計測できなかったより多くのスキーヤーの操作力を計測することが可能である。

第4章では、スキーヤーの、より自然な滑走を計測することを目指し、第3章において開発したシステムをさらに薄型化した雪面反力計測システムを開発した。さらに、薄型化する前と、薄型化した両システムを用いてスキーヤーによる実滑走実験を行った。得られた計測結果より、両システムを装着してターンを行った際の圧力中心の違いに着目し、システムの高さの違いによるスキーヤーの操作力の違いについて考察した。

第5章では、第2章から第4章までの総括を行い、結論としてまとめた。

論文審査結果の要旨

1 論文審査結果の要旨

スキーターンにおける運動のメカニズムを解明するためには、スキーヤーの操作力とターンとの関係を定量的に示す必要がある。本論文では、スキーヤーがスキー板に与える操作力と滑走速度との関係に着目したターンモデルを構築し、実滑走情報を用いてスキーターンを定量化するための新しい解析方法を提案している。本解析法を用いることにより、スキー板をたわませるための力やサイドカーブを使用するための力が、滑走速度に与える効果を定量的に示すことができるため、スキーヤーのスキル評価や指導法への応用が期待できる。さらに、本論文では、計測システムの重量や、計測専用のスキーブーツ、スキー板を装着することによるスキーヤーが受ける運動制限を低減するため、軽量な小型力センサを搭載し、個人のスキーブーツ、ビンディングに装着可能なスキー用雪面反力計測システムを提案している。また、システムの薄型化を行い、薄型化する前と、薄型化した両システムにより得られた操作力の計測結果から、ターンにおけるスキーヤーの操作力の特徴を捉え、高さの異なるシステムにおける操作力の違いを示し、その要因についても分析した。

本論文は全5章から構成されている。

第1章では、本論文の背景と目的および構成について述べている。

第2章では、実滑走における滑走速度とスキーヤーの操作力を用いたターンモデルを構築し、スキーヤーの操作力がターンに与える効果を定量的に示す解析方法を提案している。また、ターンモデルを用いて推定した滑走速度と、GPS レシーバと慣性センサ・地磁気センサを用いた滑走速度推定法により推定した滑走速度の結果を比較し、本解析方法の有効性を示している。さらに、スキー板のたわみとサイドカーブの特性を考慮した改良型ターンモデルを構築し、その有効性を示すとともに、改良型ターンモデルが改良前のターンモデルと比較して、より詳細に滑走速度とスキーヤーの操作力との関係を示すモデルであることを示した。

第3章では、小型3軸力センサを用いたスキー用雪面反力計測システムを開発し、これまでスキーヤーの操作力計測に用いてきた6軸力センサとの比較による検証実験を行うことにより、本システムの有効性を確認している。本システムは、6軸力センサと比較して小型・軽量であり、個人のスキーブーツ、ビンディングに装着が可能であることから、これまでの計測システムでは計測できなかったより多くのスキーヤーの操作力を計測することが可能である。

第4章では、スキーヤーの、より自然な滑走を計測することを目指し、第3章において開発したシステムをさらに薄型化した雪面反力計測システムを開発した。さらに、薄型化する前と、薄型化した両システムを用いてスキーヤーによる実滑走実験を行った。得られた計測結果より、両システムを装着してターンを行った際の圧力中心の違いに着目し、シ

システムの高さの違いによるスキーヤーの操作力の違いについて明らかにしている。

第5章では、第2章から第4章までの総括を行い、結論としてまとめている。

以上、本論文は、新たに開発した雪面反力計測システム及び慣性センサ等による実滑走情報を用いて、スキー板に与える操作力と滑走速度との関係に着目したターンモデルを構築し、スキーターンを定量化するための新しい解析方法を提案しており、その新規性や有効性を明らかにしている。提案した方法はこれまで定性的評価に依存してきたスキーターンの指導方法、スキル評価、用具開発等に役立てることが期待され、機械工学及びスポーツ工学に寄与する所が大きい。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分価値のあるものと認められる。

2 最終試験結果の要旨

最終試験は、平成28年7月14日（木）10時から11時10分まで理工学部2号館401会議室にて開催された博士論文公聴会において、論文内容及び関連する専門分野について学位審査委員会委員による口頭試問により行われた。主な質疑事項は次のようであった。

- (1) 横方向速度と操作力の関係について
- (2) 雪面反力計測装置の1号機と2号機のターン容易性について
- (3) ドローンを使った計測法の可能性について
- (4) 横方向速度と操作力のモデル式におけるパラメータの推定方法について
- (5) スキーターン実験におけるターン周期の影響について
- (6) 改良型モデルにおける操作力の垂直方向成分の影響及び各パラメータの物理的意味について
- (7) 雪面反力計測装置に使用している小型3軸力センサの個数と測定精度について
- (8) モデル式におけるパラメータの滑走速度や被験者による依存性について
- (9) GPS レシーバと慣性センサ・地磁気センサを用いた場合と本方法で求めた滑走速度の微小な差の原因について
- (10) 本研究で提案した計測システム、解析法の今後の展望について

以上の口頭試問に対していずれも的確な回答がなされた。

本公聴会后、同場所にて開催した学位審査委員会において審議した結果、本学位審査委員会は齊藤亜由子が最終試験に合格し、博士（工学）として十分な資格があるものと判定した。