

氏名（本籍）	<small>たなか ゆうすけ</small> 田中 優介（大阪府）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	工博甲第8号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成27年3月24日
学位論文題目	作業の現場における作業性腰部負担の簡易評価法の開発
論文審査委員	（主査）教授 川 野 常 夫 教授 井 上 雅 彦 教授 森 山 正 和

論文の内容の要旨

わが国において腰痛の自覚がある有訴者率はほぼ 10 人に 1 人の割合となっており、その割合は肩凝りや頸肩腕障害などの筋骨格系疾病の中で 1 位を占めている。また、職業別腰痛有訴率では事務職 42～49%、看護職 46～65%、介護職 63%、運輸職 71～74%、清掃職 69%などが高い割合となっている。製造工場では重量物の挙上や運搬などの重筋作業を伴うことが多く、腰の負担は大きいと推察される。また工場内での長時間の前屈位作業も腰の負担を大きくする要因であると考えられる。運輸業では、荷役の反復作業や貨物車の振動などが腰痛の要因になると考えられる。一方、介護作業にはベッドと車いす間の移乗介助、入浴介助、トイレ介助などがあり、介助者は、時には 50kg 前後の人間を支え、抱き上げながら作業することもあることから、腰への負担は想像以上に大きいと推察される。

以上のことから、作業に関連する腰痛は極めて深刻であり、対策が必要である。これまで腰部負担を推定し評価する研究は多く、モーションキャプチャや床反力計を用いて座標と力の計測を行い、逆動力学における方程式を解くことによって力学的負担を推定するもの、あるいは身体各筋肉の筋電図を測定して直接的に力学的負担を推定するものなどがある。これらはいずれも装置が大掛かりなため、実験室で再現する荷役作業や介助動作などを対象とするしかなく、実際の工場や病室、自宅での動作などを対象としていないことが多い。

本研究では工場や介護現場などの作業の現場において、作業姿勢の腰部負担を簡易に推定・評価できる評価法の開発を目的としている。評価手法としては以下の 3 つが提案されている。

- ① デジタルヒューマンモデルによる介助者腰部負担評価法
- ② タブレット PC を用いた腰部負担評価法
- ③ モーションキャプチャ **Kinect** を用いた腰部負担評価法

①のデジタルヒューマンモデルによる介助者腰部負担評価法は、コンピュータ上の仮想人間である 3次元デジタルヒューマンモデル”**Jack**” (Siemens 社)を用いて、要介護者を介助する作業者の腰部負担を推定し評価する方法である。具体的には、家庭用ビデオカメラで録画した介護現場の実際の作業姿勢を基に **Jack** で姿勢を再現し、腰部負担は **Jack** の腰痛解析ツールから求められる椎間板圧迫力で評価している。

ここで椎間板圧迫力の推定精度については、**Jack** により求められる椎間板圧迫力と **Nachemson** らの実測値データの比較を行った結果、両者の値は近い値であることが確認されている。また、ベッドから車いすへの移乗介助動作について各種計測装置を用いて椎間板圧迫力を求めた先行研究と比較した結果、**Jack** でも妥当な推定値を求められることが示されている。

本研究では、種々の測定器を用いて介助作業中の椎間板圧迫力を精度よく求めることに注力するのではなく、狭い病室や自宅の部屋での介助作業を評価し腰痛発生の予防を指導できる方法を確立することに重点が置かれた。そのために椎間板圧迫力を推定する際に必要となる介助者の手や肩に作用する外力は実測せずに、予め平均的な基準値を用意しておき、外力の絶対値（被介助者の体重の30～70%）および手と肩の外力の比（1：9から9：1まで）をパラメータとして変動させ、アウトプットとしての椎間板圧迫力の変化を見る感度分析を行っている。この方法では、実際の負荷を一意には推定できないが、その結果を介助者への姿勢改善指導に利用することができる。

以上のデジタルヒューマンモデルによる介助者腰部負担評価法はJackで再現した介助姿勢をもとに、腰の角度や手の位置などをインタラクティブに修正しながら、またリアルタイムに修正される腰部負担の大きさを見ながら、姿勢改善策を指導することができる。特にJackは3次元モデルであるため、作業者のあらゆる角度からの姿勢を詳細に検討できる特徴がある。

次に、②のタブレットPCを用いた腰部負担評価法では、工場や介護現場において作業員や介助者が実際に作業をしている姿勢を評価し、腰痛発生の危険性についてカウンセリングを行うことができる「腰痛判定カメラ」の開発を行っている。具体的にはタブレットPCを用い、作業の現場における作業姿勢を内蔵カメラで撮影してディスプレイ上に表示し、表示された身体の関節点や端点を順に指でタッチすることにより2次元人体リンクモデルを形成する。次に第4、第5腰椎の椎間板（L4/L5）まわりの力学的釣合い方程式を解くことによって椎間板圧迫力を推定する。その推定値を米国立労働安全衛生研究所（NIOSH）およびJägerの基準値と照合し腰痛発生の危険性があるか否かを判定している。

腰痛判定カメラを用いて求められる椎間板圧迫力の値の妥当性については、デジタルヒューマンJackを用いてある作業姿勢を再現し、それに対して腰痛判定カメラで求めた椎間板圧迫力とJackで計算される椎間板圧迫力を比較したところ両者は近い値であることを確認している。

また、タブレットPCのディスプレイ上でタッチする精度については、身体各部を順にタッチしてリンクモデルを作成する再現性について検証を行ったところ十分再現性は高いと判断された。さらに、本研究の腰痛判定カメラは、人体の2次元リンクモデルを基礎とするため作業員の矢状面（人体の側方からの面）を撮影しなければ誤差が生じる。撮影方向が左右にずれることでどれだけの誤差が生じるかについて検証を行った結果、作業員の側方からのずれが左右に±30°の範囲内であれば、10%以内の誤差で椎間板圧迫力を推定できることが確認された。

本研究では、腰痛判定カメラの機能として、腰にとって負担の大きい姿勢をどのように改善すればよいかを呈示するアドバイス機能と年齢性別を考慮した判定機能、さらに、

腰痛の再発性を考慮した腰痛経験者対応機能がそれぞれ開発されている。

アドバイス機能については、姿勢改善の基本方針として、L4/L5 まわりのモーメントを小さくするために、鉛直線と体幹のなす角度（体幹傾斜角）と外力が作用する手と腰の水平距離の2要因を減少させることが提案された。タブレット PC 内で椎間板圧迫力を計算後、その値が許容限界値を超えていた場合、上記の2要因についてそれぞれの値を一定間隔で減少させていき、椎間板圧迫力が許容限界値を先に下回った要因に対して、改善するようにアドバイスが画面に表示される。同時に改善後の作業姿勢がスティックピクチャでも表示される。

年齢性別を考慮した判定機能は、予め年齢と性別を入力しておき、腰痛発生の危険性の判定基準として Jäger らが提唱する年齢性別を考慮した許容限界値と照合して判定するようになっている。

腰痛経験者対応機能については、腰痛経験者や慢性腰痛患者の人たちにとって腰痛は再発しやすく、判定基準値は下がるものと考えられることから基準値の下方修正を行う方法が開発されている。そのため、事前に腰痛によって日常生活が障害される程度について、RDQ (Roland-Morris Disability Questionnaire) なるアンケート調査を行い、腰痛経験の有無と腰痛の障害の程度を調べる。その結果を先行研究による年齢・性別ごとの障害の程度と比較し、それによって推定された腰の耐性年齢から腰痛経験者に対応した発症基準が導かれた。

本研究で開発した腰痛判定カメラは、モバイル性に富み作業現場に持ち込んで容易に腰部負担の評価が可能となる。また、操作が簡単で、結果の表示がわかり易いため、カウンセラーのような専門家がいなくても、作業者どうしが互いに評価しあって、作業改善につなげることができる。また、同一作業者の履歴を残すことによって、時間的な経過を追うことが可能となり、一度だけの指導ではなく長期にわたって腰痛予防の指導を行うことが期待される。

最後に③のモーションキャプチャ Kinect を用いた腰部負担評価法については、作業中の動作を連続でモニタリングする方法が確立された。モーションキャプチャ Kinect (Microsoft 社製) は、リアルタイムに全身の主な関節の3次元座標を PC に入力することができる装置である。しかも測定対象の作業者に特別なマークも不要である。

本研究ではこれらの特徴を生かして、作業者の作業動作をリアルタイムに計測し、同時に椎間板圧迫力を推定して、腰痛発生の危険性を作業者にリアルタイムに報せる腰痛アラームシステムが開発されている。腰痛アラームとして、ここではスマートフォンのバイブレータを用い、PC から無線 LAN を介して信号が送信される。本システムを実際の工場に設置し、作業者の姿勢を常時モニタリングしながら腰部負担を推定し、腰痛発生の危険があると判定される瞬間に、作業者が携帯するスマートフォンのバイブレータを振動させることによって、作業者自身が危険性に気づき、作業動作と腰の負担の関

係を体得することができる。

以上、本研究では、作業の現場で作業者の腰部負担を容易に評価できる3とおりの方法が確立された。**Jack**による方法は、現場の種々の作業動作をビデオカメラに録画しておけば、あとで3次元姿勢に対して詳細な検討が可能である。タブレットPCによる腰痛判定カメラは、2次元姿勢に対して現場で極めて簡便に評価できるため、筋骨格系の疾病に専門知識のない作業者どうしても、ゲーム感覚で学習ができる利点がある。**Kinect**による方法は作業中の動きも含めて腰部負担をリアルタイムに評価し、腰痛の警告をリアルタイムに行える特徴がある。いずれの方法も作業の現場での実用性に優れており、活用する現場と評価対象に応じて使い分けることで、幅広い作業現場で利用可能であり、作業者が作業姿勢と腰の負担の関係を学習する上で大いに役立つものと考えられる。

論文審査の結果の要旨

わが国において腰痛の自覚がある有訴者率は高く、肩凝りや頸肩腕障害などの筋骨格系疾病の中で1位を占めている。また、職業別腰痛有訴率では運輸業、製造業、看護職、介護職、清掃職などが高い割合となっており、腰痛発症による欠勤や離職が問題となっている。このことから、作業に関連する腰痛は極めて深刻であり、作業現場では日々対策に追われているのが現状である。

これまでに腰部負担を推定し評価する研究は数多く存在し、モーションキャプチャや床反力計を用いて座標と力の計測を行い、逆動力学における方程式を解くことによって力学的負担を推定するもの、あるいは身体各筋肉の筋電図を測定して直接的に力学的負担を推定するものなどがある。しかし、これらはいずれも装置が大掛かりなため、実験室で再現する荷役作業や介助動作などを対象とするしかなく、実際の工場や病室、自宅での動作などを対象としていないことが多い。

このような背景の下、学位申請者の研究は、工場や介護現場などの作業の現場において、作業姿勢の腰部負担を簡易に推定・評価できる評価法の開発を目的としている。提案手法として、学位申請者は大きく以下の3つの手法を提案している。すなわち、

(A) デジタルヒューマンモデルによる介助者腰部負担評価法

(B) タブレット PC を用いた腰部負担評価法

(C) モーションキャプチャ Kinect (マイクロソフト社) を用いた腰部負担評価法である。(A) のデジタルヒューマンモデルによる介助者腰部負担評価法は、現場で作業動作を撮影したビデオ画像をもとに、コンピュータ上の仮想人間である3次元デジタルヒューマンモデル” Jack” (Siemens 社) で作業を再現し、要介護者を介助する作業者の腰部負担を” Jack” の腰痛解析ツールで評価する方法である。解析に必要な外力は測定をせずに、想定される値をすべて入力することによって腰部負担の範囲を求め、姿勢改善指導に利用するという考え方が採用されている。この方法は新規性があり、作業現場にビデオカメラを持ち込むだけでよく、極めて簡便で、また Jack の特性から3次元の作業姿勢の評価が行えることから、実用性に優れている。

(B) のタブレット PC を用いた腰部負担評価法では、工場や介護現場において作業者や介助者が実際に作業をしている姿勢を評価し、腰痛発生の危険性についてカウンセリングを行うことができる「腰痛判定カメラ」の開発を行っている。これは内蔵カメラで撮影した作業姿勢を指でタッチする手作業により身体各点の座標を入力し、力学モデルに基づいて腰部負担を推定するものである。座標入力は自動化せずに、作業者自身が作業姿勢を再認識できるように学習性を意識して、敢えて手作業を残している。本研究

では、腰痛判定カメラの機能として、腰にとって負担の大きい姿勢をどのように改善すればよいかを呈示するアドバイス機能と年齢性別を考慮した判定機能、さらに、腰痛の再発性を考慮した腰痛経験者対応機能がそれぞれ開発されている。これらの操作が極めて簡便であるとともに、タブレットPCは作業現場に容易に持ち込むことができるため、筋骨格系の疾病に専門知識のない作業者どうしても、ゲーム感覚で腰痛予防の学習ができる利点がある。以上の研究成果は極めて新規性、有用性に優れており、作業現場の腰痛対策ツールとして実用化が期待される。

(C) のモーションキャプチャ **Kinect** を用いた腰部負担評価法については、**Kinect** が極めてコンパクトなモーションキャプチャであることを利用し、作業中の動作を連続でモニタリングする方法が確立されている。これは、作業者の姿勢を常時モニタリングしながら腰部負担を推定し、腰痛発生の危険があると判定される瞬間に、作業者が携帯するスマートフォンのバイブレータを振動させることによって、作業者自身が危険性に気づき、作業動作と腰の負担の関係を体得することができるものである。**Kinect** により作業姿勢を完全にモニタリングするには改善の余地があるが、腰痛発症の警告を振動触覚によりリアルタイムに体得させる方法は新規性および有効性が認められる。

以上のように学位申請者が提案した一連の腰部負担簡易評価法は、これまで作業現場において困難であった評価を可能とするものであり、作業現場の特性に合わせて3手法を使い分けることにより、作業に起因する腰痛予防に大いに寄与するものと考えられる。

よって本論文は、博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。