

装着型ロボットの接触安全性評価試験方法の研究

— 下肢ダミーを用いたロボット装着者への負担の再現方法に関する検討 —

秋山 靖博^{*1}, 伊藤 安海^{*1}, 山田 陽滋^{*1}, 伊藤 浩治^{*2}, 小田 志朗^{*3},
岡本 正吾^{*1}

Research about test method of contact safety assessment for wearable robot -- Analysis about a method to mimic the burden of a wearable robot using a low leg dummy --

Yasuhiro Akiyama^{*1}, Yasumi Ito^{*1}, Yoji Yamada^{*1}, Koji Ito^{*2}, Shiro Oda^{*3},
and Shogo Okamoto^{*1}

^{*1} Department of Mechanical Science & Engineering, Nagoya University
Furocho, Nagoya, Aichi 464-8603, Japan

^{*2} Toyota Industries Corporation
Toyoda-cho 2-1, Kariya, Aichi 448-8671 Japan

^{*3} Toyota Motor Corporation
Toyota-Cho 1, Toyota, Aichi 471-8571, Japan

A method of safety test of wearable robot is important to spread wearable robot. However, the test methods for their safety assessment are not established. Therefore, we aim to propose a test method of contact safety of wearable robot and contribute to establish a safety standard of wearable robot. To test a wearable robot, human wearer should not be used because of ethical reason. Therefore, a low leg dummy was made to measure the burden of wearer. The dummy should mimic the motion of human to evaluate the burden of wearer. In the paper, an ergonomic motion human knee is focused on because such misalignment is inherently inevitable: The center of rotation at a human knee joint changes with his/her knee's bending angle.

In the experiment, interaction forces at the applied part between a wearer and a wearable robot are measured in a stand and sit motion which is a basic usage of a wearable robot. By using a commercially available wearable robot, a human and the dummy are tested as a wearer. As a result, the dummy can mimic the trade of burden of wearer in some degree. However, advanced research is needed for a quantitative analysis. For example, features of skin and shape are focused on in future.

Key Words : Wearable Robot, Life Support Robot, Safety

1. 緒 言

1・1 研究の背景 現在, 高齢社会における高齢者, 障害者の QOL の向上および労働者の生産性向上を目的として, 装着型パワーアシストロボット(以下, 装着型ロボット)等の生活支援ロボットの実用化に向けた研究開発が進んでいる. 装着型ロボットは, 使用者にカフ等によって固定し, 固定部を通じてそのパワーを伝達する形態のロボットである. 装着者をアシスト

することで, 歩行支援, リハビリ支援, 作業支援等に用いることが期待されている.

しかし, 装着型ロボットは使用者に密着して使用するため, 人間工学的な不整合に起因するリスクが生じうる. 表 1 に, 装着型ロボットのリスクアセスメントの結果を示す. なお, 当面は介助者および装置による支持条件下で使用される状況を想定し, 高いリスクを持つ転倒については対象から除外し, 接触安全性に焦点を当てた検討を行うこととした. 装着型ロボットの開発, 普及に際しては, これらのリスクを低減し, 十分な安全性を確保すると共に, それを検証する安全性検証手法を確立する必要があるが, 実際に人間に装着させての安全性評価試験を行うことは, 倫理的制約から不適切であると判断される.

^{*1} 名古屋大学工学研究科機械理工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町){akiyama-yasuhiro, yamada-yoji, okamoto-shogo, haras}@mech.nagoya-u.ac.jp

^{*2} 豊田自動織機(〒448-8671 愛知県刈谷市豊田町 2-1)ito.koji@e.mbox.nagoya-u.ac.jp

^{*3} トヨタ自動車(〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町 1 番地)oda.shiro@d.mbox.nagoya-u.ac.jp

Table 1 Ergonomic hazard of wearable robot

	Hazard source	Potential consequence result
Ergonomic hazards	Misalignment at center of rotation of joint	Overload at human joint
	Decrease in DOF of joint	Overload at human joint
	Constriction of fitting parts	Internal bleeding, Abrasion of skin

例えば、現在開発中の装着型ロボットには非常に強い出力を有するものもある⁽¹⁾が、こうした装着型ロボットの安全性試験に人間を使用することは困難である。そのため、人間が装着することなく行える安全性評価試験方法の開発が求められている。

なお、近年開発が報告されている装着型ロボットの中には安全性について一定の配慮を行っているものもある⁽²⁾⁽³⁾が、いずれも機構開発に注目した研究であり、リスクアセスメント、安全性検証実験といった安全工学的観点からの検討は不十分である。また、皮膚に加わる力と不快感の関係についての研究⁽⁴⁾が安全性評価を目的として行われているが、そうした成果を用いるには、装着型ロボット使用時の作用力の推定が不可欠である。

これらの点を踏まえ、本研究グループでは装着型ロボットの接触安全性評価試験方法の確立を目的として、装着型ロボットの使用によって生ずる装着者への負荷力を用いた装着型ロボットのリスク評価を行うとともに、安全性評価試験への使用を前提とした人体下肢ダミーの提案を行い、その開発を行ってきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。このような研究に対しては、類似の研究開発事例は報告されていない。

1・2 装着型ロボット接触安全性試験方法の提案

装着型ロボットの実用化促進の観点を踏まえると、安全性検証試験は、装着のリスクを正確に評価すると共に、被試験者に過度の負担を与えない方法の下で行われることが必要である。そのため、本研究グループでは、実際の負荷計測を伴わない過程と、人体ダミーを用いた負荷計測を行う過程の多段階の試験を提案している。図1に、提案する試験手法の流れを示す。

本試験ではまず、装着者-装着型ロボット間の不整合要因の有無を確認する。まず、装着型ロボット関節部が人間と比較して十分な機構自由度を有するかどうかを確認する。次に、装着部が不整合に対応する十分な可動性を有するかどうかを確認する。これらにより十分に不整合の発生を抑制できると認められる場合には、本試験に適合したと判断できる。

不整合要因を十分に除去できないと認められる場合には、試験装置を用いた試験を行う。本試験においては、人体ダミーに試験の対象となる装着型ロボット

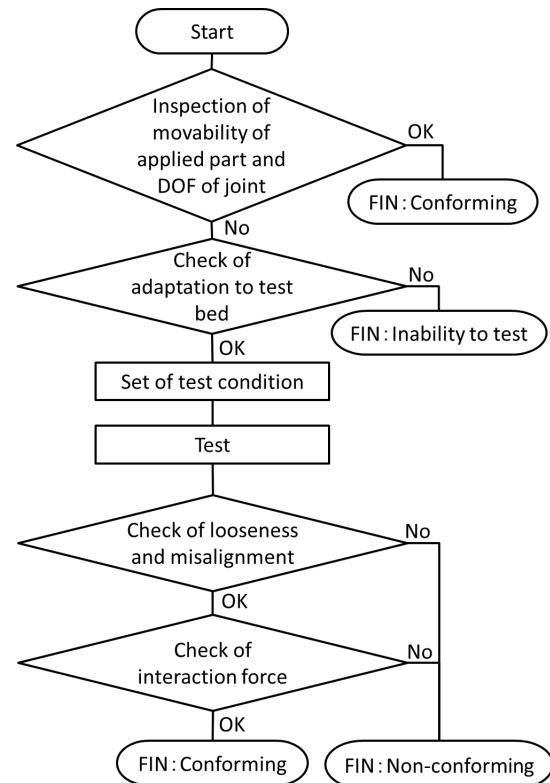


Fig. 1 Flow of the safety test

を装着し、実際の使用が想定される動作を行う。その際、ダミー内部および装着型ロボット装着部において負荷を計測する。本試験において装着部の顕著な緩み、外れおよび機構のずれが生じた場合には、再度調整して試験を実施する。

試験の結果、ダミー内部および装着部の負荷が基準値以下であり、装着部の緩み、外れ、機構のずれが許容範囲内である場合については、本試験に適合したと判断できる。

すなわち、本方法においては、十分な冗長性及び調節部位を有することにより人間工学的危険源を除去できると判断できるケースについては負荷の計測を安全性検証試験に対する適合判断の要件としないことで検証の簡素化を図る一方、危険源を除去できないケースについては人体ダミーを用いた動作試験により装着者への負荷を計測することでその安全性を評価することが可能となる。

また、本試験は現時点においては変性関節、拘縮等の関節動作に影響する疾患を有する装着者への影響を

考慮していない。そうした疾患を有するケースについては個人差が大きく統一的な評価が困難であると想定される。そのため、今後、ダミーの調整部位の増加等により個別の患者を対象としたオーダーメイドの安全性評価等を実現することが有効であると考えられる。

1・3 装着型ロボットにおいて対象とするハザード

表1に示したリスクアセスメントの結果より、装着型ロボットの使用により予想されるハザードは、装着部位に直接作用するものとそれ以外の部位に作用するものに分類される。前者は、ベルト、靴、カフ、パッド等を通して装着部皮膚、皮下組織等に影響するハザードであり、後者は関節部における負荷等のハザードである。また、そのリスク要因には、人間と装着型ロボットの関節機構のミスマッチ、初期装着状態の不具合、装着部形状・材質の不適合などが挙げられる。

これらのリスク要因のうち、本研究ではまず、人間の膝関節回転中心とロボットの同部ジョイントの回転運動時の中心軌跡の不一致に注目し、両者の不整合性の定量化およびこれに起因する人間の装着部への影響の計測、再現を行った。これは、人体の膝関節が関節の屈曲により回転中心を変化させる構造となっており、機能安全や装着方法の改善のみで対処することが困難な構造的要因を有するためである。

図2に、人体と装着型ロボットの膝関節構造の違いを示す。人体の大腿脛骨関節(膝関節)は、屈曲時に転がりと滑りからなる複合的な運動を示すことが知られており、膝関節の回転中心は屈曲角に応じて移動する⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。それに対し、現在、実用化が目指される多くの装着型ロボットは膝関節を1自由度の回転機構で構成しており、膝関節の屈曲に伴う装着者と装着型ロボットの間での回転中心の不整合が危惧される。なお、不整合の影響は装着型ロボット装着部への負荷として生じると考えられる。負荷は下肢長軸方向および前後方向に生じうるが、本研究ではまず、長軸方向負荷に注目して検討を進める。これは、前後方向のずれは関節中心との距離に反比例して減少するため、長軸方向と

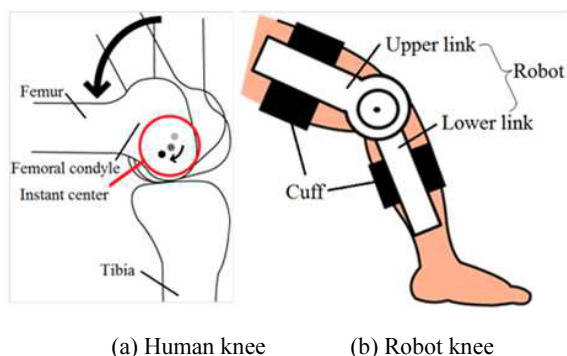


Fig. 2 Difference of knee rotation mechanism

比較してずれ量が抑制できると考えられるためである。

2. 装着型ロボットが人体に及ぼす負担の計測

2・1 起立着座動作に伴う人体作用力の測定

本研究では、ダミー使用時の作用力と比較するため、人体装着時の負担を計測した。なお、本実験では、すでにリハビリ用途での使用実績があり、装着者への安全性が確認されている装着型ロボットを用いた。

また、装着型ロボット装着時の負担は、重力方向、複数関節の連動動作等による影響を受けるため、実際の使用条件に近い姿勢での計測を行うことが望ましい。そのため、本実験では、図3に示すような立ち座りを行うことで膝関節の屈伸を行い、その際に下腿装着部上下方向に働く力を計測した。また、手すりを用いて上体を支持することで繰り返し動作に伴う動作のばらつきおよび装着者の負担軽減を行った。計測には力覚センサ(キスラー社製、9602)を用い、図4に示すように、ロボット取付け部に設置した。また、関節角度は、装着型ロボット膝関節に取り付けたエンコーダ(光洋社製、TRD-2E3600V)を用いて検出した。

また、これまでの研究⁽⁶⁾により下腿部作用力は装着時の人体-装着型ロボット間の膝関節中心位置のずれの影響を受けることが明らかとなっているため、本実験に先立ち、調節可能な最小単位で装着状態をパラメトリックに変更して予備実験を行い、最も発生作用力

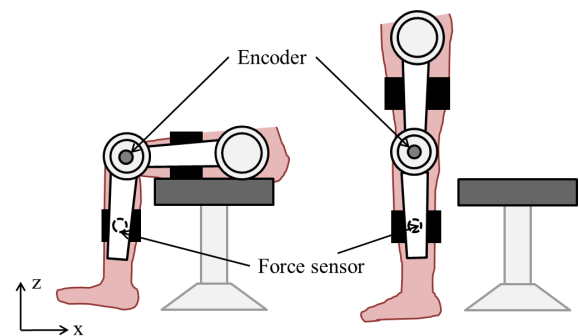


Fig. 3 Measurement of the force associated with knee bending

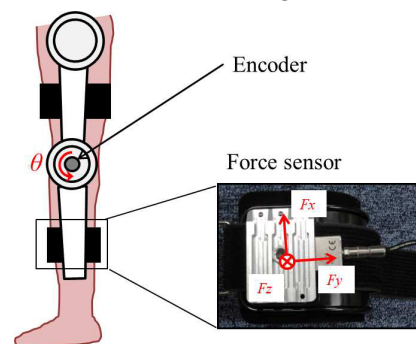


Fig. 4 Interactive force measurement system

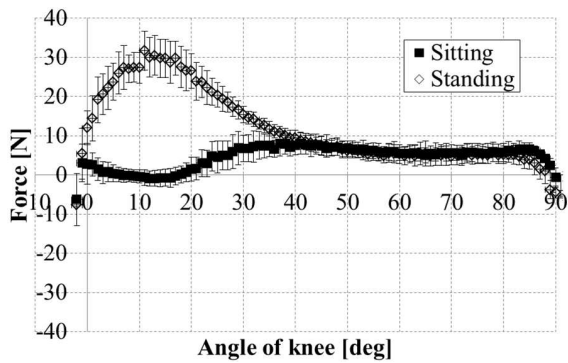


Fig. 5 Axial force between human low thigh and robot

の変化量が少ない装着位置を見出し、この条件下で実験を行った。

図5に、上記条件下で起立、着座の繰り返しにより10回の膝関節屈伸実験を行い計測した、下腿部x軸方向力を示す。膝関節の屈曲に伴い、装着型ロボットから装着者に対し、装着者下腿を持ち上げる方向に力が作用していることがわかる。

また、作用力は膝関節屈曲時、伸長時で異なる傾向を示し、特に起立時においては関節伸展に伴い屈曲時よりも大きな作用力が発生している。これには、動作に伴い大腿および下腿の装着部でねじれ、すべり等が発生し、人体と装着型ロボットの幾何学的配置が変化することで作用力に影響した可能性が考えられる。

本実験の結果から、起立着座動作によって装着型ロボットと装着者の間に不整合が生じ、下腿装着部に力が発生し、装着者の負担となる可能性が示された。また、その作用力の傾向の取得に成功した。なお、本実験の結果は、これまでの研究⁵⁾の結果と若干の相違点が認められる。これは、動作時の上体姿勢が影響している可能性が考えられ、今後の検討を要する。

2・2 人体表面特性再現の試み 装着型ロボットによる装着者への負荷は、多くが装着部の皮膚、皮下組織を通じて伝達されると考えられることから、人体の皮膚特性の計測およびそれを用いた人工皮膚の開発が必要とされている。本研究においては、引張圧縮試験機およびレオメータを用いて人体および各種素材の計測を行い、人工皮膚の開発に向けた研究を行っている。

3. 下肢ダミーを用いた人体への負担の再現

3・1 下肢ダミーの製作 装着型ロボットの接触安全性試験方法の確立のため、膝関節屈曲時における人体下腿の動作計測結果を用いて下肢ダミーを製作し、装着型ロボット使用時に人体下腿上下方向に発生する作用力の再現を試みた。下肢ダミーは、装着型ロボットとの不整合を再現するため、人体の関節屈曲時挙動を再現することが求められる。本研究においては、前

述のように膝関節屈曲時の下肢矢状面上における回転中心の移動に注目し、それに伴う装着型ロボット装着部の変位を再現した。これまでの研究⁵⁾により、膝関節角度に対応した下腿装着部変位量の再現が行われており、本研究においても同様のパラメータを用いた。また、本研究においては、下肢の対称性を考慮し左脚のみに人体特性再現機構を搭載した。図6に、試作した左脚ダミーの大腿部、下腿部およびそれをつなぐ膝関節部を示す。膝関節部は一軸回転ジョイントとなっている。また、下腿部には軸方向駆動機構を備え、膝関節屈曲角の関数として駆動させることで、人体の計測によって取得した装着部の変位を再現する構造となっている⁶⁾。外径は円形であり、AISTの人体データベース¹¹⁾を用いて算出した成人男性の平均的な周長である、539.2 mm(大腿)および362.5 mm(下腿)となるように設計されている。さらに、人体の皮膚および皮下組織による摩擦および弾性を表現するため、ダミーにはウレタンおよびゲル(硬度: Asker C 5)によって構成される人工皮膚を装着した。

次に、図7に、下肢ダミーの概観を示す。本下肢ダミーは、耐久試験用ダミー(産業技術総合研究所製)をベースに、左脚部を図6に示す左脚ダミーに置き換えて製作した。本下肢ダミーは、左右の股関節、膝関節、足部関節にそれぞれ一軸の回転ジョイントを有し、他動的な動作が可能となっている。また、起立時には腰部上方より懸架する必要がある。本研究においては、本下肢ダミーに装着型ロボットを装着し、他動的に動作をさせて作用力の計測を行った。

3・2 計測方法 本研究においては、装着型ロボット使用時の動作として頻度が高いと考えられる起立着座動作を対象として、下肢ダミーを用いた作用力計測を行った。起立着座動作は、下腿部を床面より垂直に固定し、腰部を介護リフト(パラマウント社製、床走行式電動介護リフト)を用いて懸架し、上下、前後に動作させることで他動的に行った。また、繰り返しの起立着座時に姿勢の再現性を高めるため、事前に計測姿勢

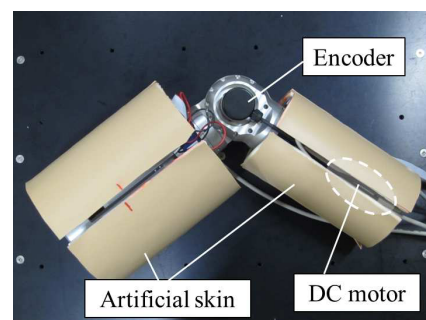


Fig. 6 Overview of the parts of the left leg dummy

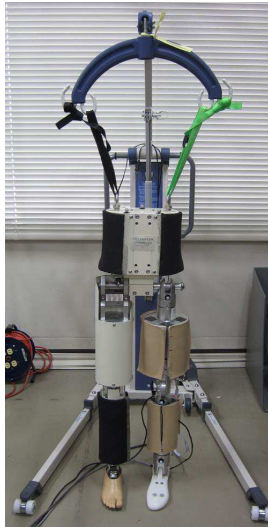


Fig. 7 Overview of the low leg dummy

を決定し、姿勢変更時に調整した。また、膝関節角度はモーションキャプチャによって装着型ロボットリンクに設置したマーカを観測することで求めた。

3・3 下腿への作用力の測定 下肢ダミーに装着型ロボットを装着し、10回の起立着座実験を行った。図8に、図4で示した座標系におけるx軸方向の作用力を示す。

人体の結果である図5と比較すると、起立時、着座時における発生作用力傾向に差がないことが分かる。これは、人体ダミー使用時には姿勢調整のために細かな上下、前後動作を伴うため、下肢ダミー装着型ロボット間の姿勢が平均化されたためと考えられる。また、膝関節角度 0° 付近では作用力のばらつきが大きくなっているが、これは直立姿勢においてはリフトによる吊り上げが下肢ダミーの姿勢変動に与える感度が低下しているためと考えられる。また、膝関節増加時には作用力が負となっているが、これは上記吊り上げ時に装着部がずれることにより作用力にオフセットが発生しているためと考えられる。

また、全体的な傾向としては、膝関節角度 20° 付近において作用力が増加し、それ以外の姿勢では低下す

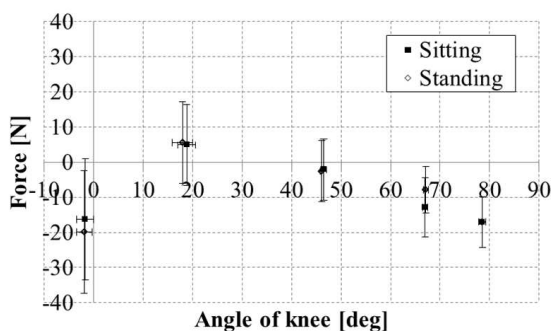


Fig. 8 Axial force between low leg dummy and robot

るという傾向となっており、これは図5に示した人体装着時の起立時の作用力発生傾向と定性的に近い結果である。また、人体装着時には起立時により高い作用力を示すことから、本結果は危険側の作用力を模擬していると考えられ、安全性評価にはより適した条件である。今後、危険側の評価が成立する領域については検討を進める必要がある。

4. 下肢ダミー皮膚の動的粘弾性特性

4・1 下肢ダミー皮膚 本実験で使用した下肢ダミー表面は、人体の皮膚および皮下組織による摩擦および弾性を表現するため、ウレタンおよびゲル(硬度: Asker C 5)によって構成される人工皮膚が装着されている。しかし、実際の装着型ロボット使用中に装着者の皮膚が受ける荷重は動的であり、皮膚のような粘性の大きな材料では、その影響が無視できない可能性がある。そこで、レオメータを用い下肢ダミー人工皮膚の動的粘弾性を調べた。

4・2 レオメータによる動的粘弾性測定 本研究では、図9に示すレオメータ(TA インストルメント社製, AR550)を用いた。レオメータ下部の測定ステージは固定されており、プローブにずり変形を与え粘弾性特性値を求めた。変形が大きい領域で試料(人工皮膚)と測定ステージの間で滑りが発生することを防ぐため、試料は両面テープでステージに固定することとした。測定結果を図10に示す。

図10からわかるように貯蔵弾性率 G' (歪と同位相の弾性応力の比率であり、材料が弾性的にエネルギーを貯蔵する能力に関連)、損失弾性率 G'' (歪とは異なる位相の比率であり、材料が応力を熱として散逸する能力に相当)共に変形速度依存性を示し、特にゲルの G'' はその影響が大きいことが分かった。また、皮膚と皮下組織の複合体を模擬してウレタンとゲルを積層したものの粘弾性特性値を求めた結果、ゲル単体の特性値に近い(ゲルの特性が支配的な)結果となった。



(a) General view

(b) Probe

Fig. 9 Viscoelasticity determination equipment

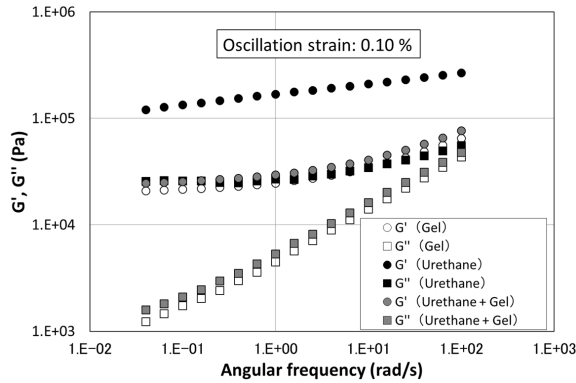


Fig. 10 Viscoelasticity determination result

以上より、人工皮膚の粘弾性特性は変形速度の影響を大きく受けるため、評価対象とする人体損傷(褥瘡など)を生じさせる変形速度領域において、人体の粘弾性特性と近い模擬皮膚(皮膚+皮下組織複合体)を開発する必要があることが明らかとなった。

なお、*in vivo* で人体皮膚の粘弾性特性の測定を試みた研究としては根本らの研究⁽¹²⁾があり、本研究と同様のひずみ条件での腕の3か所の測定結果(N=1)として $5.0 \times 10^4 < G' < 9.0 \times 10^5$, $5.0 \times 10^3 < G'' < 3.0 \times 10^5$ が示されている。今回の測定結果はその範囲内に入っているものの、人体の測定結果は部位によって非常に大きく G' , G'' の値が異なるため、部位毎に人工皮膚の特性を人体に合わせる必要がある。

5. 結 言

本研究では、装着型ロボットの安全性検証試験方法の提案および人体装着時の作用力計測実験および下肢ダミーの試作、評価を行った。装着型ロボットの安全性についてははまだ基準が設定されておらず、それを目的とした研究もおこなわれていない。

本研究ではまず、装着型ロボットのリスクアセスメントを行い、想定される危害およびリスク要因の検討を行った。また、市販の装着型ロボットを使用して人体装着時の装着部作用力を計測した。最後に、下腿伸長機構を有する下肢ダミーを製作し、起立着座動作を模擬した動作によって、装着型ロボット装着時の下腿装着部に生じる負荷の再現を試みた。

その結果、下肢ダミーによって人体装着時の起立動作時の作用力発生傾向を定量的には再現できていることが確認できた。今後は、ダミーの人工皮膚の特性を人間の皮膚特性に合致させ、発生作用力を定量的に一致させる方向で改良を進める。

また、具体的な安全基準の検討、関節屈曲に伴う皮膚の流動や下肢断面形状変化の影響評価等を行い、安全性評価手法の確立を目標とした検討を続ける。

謝 辞

本研究は、産業技術総合開発機構(NEDO)から受託している「生活支援ロボット実用化プロジェクト」の支援の下で実施された。本研究に協力頂いた大西惟史、本研究に助言を頂いたコンソーシアムのメンバー諸氏(河上敬介、磯貝香、富永敬三、平野裕滋、石原正博、伊藤寿美夫、本間敬子、以上所属・敬称略)に感謝する。

参 考 文 献

- (1) G.P. Rosati Papini, and C.A. Avizzano, "Transparent Force Control for Body Extender," 2012 IEEE RO-MAN, (2012), 1P1-12
- (2) 池原忠明, 田中英一郎, 梶原陽介, 牛田卓朗, 小島翔, 弓削類, "実用化に向けた密着型歩行補助機の開発と支援効果の検証," ROBOMECH2011, (2011), 2P1-F10.
- (3) 余永, 松田純, 吉松春樹, "シンプルかつ高感度な Sensor-Motor Mechanism による膝関節パワーアシストの実現," RSJ2011, (2011), AC1H3-6.
- (4) Mohammad Esmacili, Kumudu Gamage, Eugene Tan, and Domenico Campolo, "Ergonomic considerations for anthropomorphic wrist exoskeletons: a simulation study on the effects of joint misalignment," 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2011), pp. 4905-4910.
- (5) 秋山靖博, 山田陽滋, 伊藤浩治, 小田志朗, 岡本正吾, 原進, "装着型ロボットの接触安全性評価試験方法の研究 -膝関節部の不整合について- の下肢ダミーによる検討," 第17回ロボティクスシンポジウム, (2012), p.331-336
- (6) Yasuhiro Akiyama, Yoji Yamada, Koji Ito, Shiro Oda, Shogo Okamoto and Susumu Hara "Test Method for Contact Safety Assessment of a Wearable Robot -Analysis of Load Caused by a Misalignment of the Knee Joint-," 2012 IEEE RO-MAN, (2012), 2P2-4
- (7) Victor H. Frankel, Margareta Nordin, 山本真, 笹田直, "整形外科バイオメカニクス入門," 南江堂, (1983)
- (8) Gary L. Smidt, "Biomechanical analysis of knee flexion and extension," Journal of Biomechanics, vol.6, (1973), pp. 79-92
- (9) Ralph Nisell, Gunnar Nemeth, and Hans Ohlson, "Joint forces in extension of the knee," Acta Orthop Scand 57, (1986), pp. 41-46
- (10) Gary, T. Yamaguchi and Felix E. Zajac, "A planar model of the knee extensor mechanism," Journal of Biomechanics, vo.22, no.1, (1989), pp. 1-10
- (11) 産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター, "AIST/HQL 人体寸法・形状データベース 2003," AIST, (2003)
- (12) T. Nemoto, Z. Isogai, K. Koide, Y. Itoh, F. Nogata, A. Shimamoto and H. Matsuura, "Viscoelasticity Measurement of Skin *In Vivo* by Rheometer," Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vo.21, issue 2, (2007), pp. 33-36