

装着型ロボットの接触安全性評価試験にむけた下肢ダミーの開発

Development of a low leg dummy for a contact safety test of wearable robot

○秋山靖博(名古屋大) 伊藤安海(名古屋大) 山田陽滋(名古屋大) 伊藤浩治(豊田自動織機)

小田志朗(トヨタ自動車) 岡本正吾(名古屋大) 原進(名古屋大)

Yasuhiro AKIYAMA, Nagoya University
 Yasumi ITO, Nagoya University
 Yoji YAMADA, Nagoya University
 Koji ITO, Toyota Industries Corporation
 Shiro ODA, Toyota Motor Corporation
 Shogo OKAMOTO, Nagoya University
 Susumu HARA, Nagoya University

Abstract: A method of safety test of wearable robot is important to spread wearable robot. Therefore, we aim to propose a test method of contact safety of wearable robot and contribute to establish a safety standard of wearable robot. As a result of risk assessment, ergonomic mismatch between human and wearable robot is focused on in this research. For example, a movement of the center of rotation of a knee joint in sagittal plane and rotation motion of lower thigh are potentially hazardous because these mismatches potentially harm the human joints and skins. 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. In experiments, the dummy was attached to the wearable robot and was moved in various attitudes. As a result, it is suggested that the attitude of the dummy strongly affect the force at the lower thigh cuff. Therefore, it is important to test in various motions to evaluate the safety of wearable robot.

Key Words: Wearable Robot, Contact Safety, Ergonomics

1. はじめに

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、生活支援ロボットの实用化に向けた研究開発が進んでいる。それらのひとつが、装着型パワーアシストロボット(以下、装着型ロボット)である。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必要がある、一般的な機械に適用される電氣的、機構的、構造的安全性に加え、人間工学的な不整合に起因するリスクにも配慮が必要である。Table. 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。また、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。

しかし、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。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。

Table 1 Hazards of wearable robot

Category	Hazard source	Potential consequence result
Ergonomic hazard	Misalignment at center of rotation of joint	Overload at human joint
	Constriction of fitting parts	Internal bleeding, Abrasion of skin
Mechanical hazard	Lock of joint	Overload at human joint
	liquid spill	Burn injury of skin
Electrical hazard	Leakage of electricity	Shock

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、冗長自由度の確保やバックドライバビリティ、既存装具の使用等によって、安全性について一定の配慮を行っているものもある⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかし、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。安全性評価方法を目的とした研究では、皮膚に加わる力と不快感の関係についての研究例⁽⁴⁾があるが、そうした研究成果を安全性評価に用いるには、装着型ロボット使用時の作用力の推定が不可欠である。

このように、現在のところ装着型ロボットの安全性の確保は個々のグループの裁量により行われており、安全性評価方法が確立されていない。この点を踏まえ、本研究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。

2. 装着型ロボットの装着に伴うリスク

2-1 想定する動作

装着型ロボットを使用時の動作は、目的、装着部位に応じて異なるものとなるが、本研究では、普及の早期段階で想定される医療・福祉用途の中でも、特に QOL への影響が大きいと考えられる下肢への装着による歩行・移動支援を対象とした。

また、下肢装着型ロボットを使用する際の動作としては、立ち座り、平地歩行、坂道歩行、段差昇降などが想定される。中でも、立ち座り、平地歩行は特に使用シーンが多いと考えられるため、本研究ではまずこれら両動作を想定した検討を行った。

立ち座りでは、膝関節を 90 度程度屈曲した着座姿勢から直立姿勢への移行およびその逆の動作を想定した。その際、膝関節、股関節は共に 90° 付近の屈曲角度から 0° 付近まで連動して伸展する動作を行う。また、股関節については動作の過程で 90° 以上の屈曲を伴う場合もある。

一方、平地歩行では、股関節、膝関節、足関節が連動して動作する一方で、それぞれの関節の動作角度は足関節を除き起立着座に比べれば狭い範囲となっている。

2-2 危害の発生メカニズムおよび予想される危害

想定される動作および Table. 1 に示す人間工学的リスクを考慮し、危害が想定される個所についての検討を行った。

まず、不整合発生原因としては、膝関節の屈曲に伴う回転中心の移動による矢状面上での回転中心の不一致が考えられる。Fig. 1 に示すように、人体の膝関節においては、屈曲時に大腿骨顆部が脛骨上を回転しながら並進する動作が発生する。そのため、関節屈曲に伴い回転中心は矢状面上を移動する⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾。一方、ロボットは関節部を一軸ジョイントで構成することが一般的である。装着型ロボットにおいても同様の構成とした場合、膝関節の屈曲に伴って装着者と装着型ロボットの膝関節回転中心がずれ、装着者関節部および装着部への負担となる可能性がある。

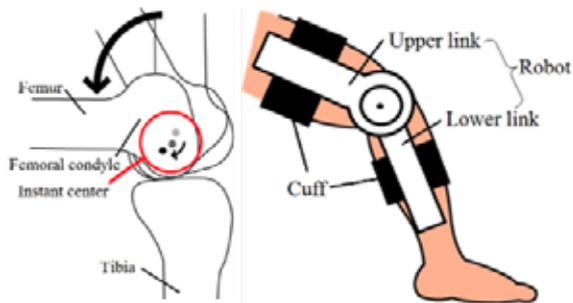


Fig. 1 Difference of knee rotation mechanism

次に、人体膝関節においては、大腿骨顆部の形状および結合組織の非対称性から、屈伸動作に連動して回旋が発生する。特に膝関節角度 0° 付近ではこの傾向が顕著であり、伸展につれて外旋動作が発生する⁽⁷⁾。装着型ロボットにおいて前述のように一軸の膝関節を使用した場合、人体膝関節の回旋運動によって、膝関節回転軸がずれ、装着者関節部及び装着部への負担となる可能性がある。

また、人体の関節屈伸運動によって主に動作するのは骨であるが、装着型ロボットは一般的にカフ、ベルト、靴等

を用いて体表に固定される。そのため、皮膚および皮下組織に対し、力が発生する。また、関節屈曲に伴い皮膚、皮下組織には伸長、変形が発生し、骨との相対位置が変化する。そのため、装着型ロボットと装着者の接触部位のずれにより装着者装着部に負担が生じる可能性がある。

また、それ以外にも、足部関節における回転中心の不一致、内外反の自由度不足等により、装着者への負担、歩容の変化等が生じる可能性が想定される。

3. 下肢ダミーの製作

3-1 下肢ダミー製作において考慮する要素

本研究においては、装着型ロボットの接触安全性評価のため、人体下肢の動作を模擬する機能を有するダミーを製作した。上記メカニズムにより装着者への負担が想定される個所として、本研究ではまず、下腿装着部長手方向作用力に注目した。これは、下腿部は皮下組織が大腿部に比べ薄く、装着部のずれを吸収することがより困難であると考えられるためである。また、下腿装着部長手方向作用力に影響を与える要素として、矢状面上における人体膝関節の回転中心の移動に注目した。

3-2 下肢ダミーの構造

Fig. 2 に、下肢ダミー膝関節周辺部を示す。本ダミーは、一般的なロボットと同様に一軸の膝関節を有するが、膝関節回転中心の移動に伴う装着部変位を再現するため、下腿部にスライド機構を有する。これにより、膝関節角度に対応して下腿装着部位置を変化させることが可能となった。なお、人体における装着型ロボット装着部動作軌跡は、モーションキャプチャ装置 (Motion Analysis 社製 MAC 3D System) を用いて計測した。その結果、90° の屈曲で下腿装着部は膝関節伸展時の膝関節中心から 12mm 程度遠ざかることが確認された。

また、大腿、下腿の周径は人体データベース⁽¹¹⁾に基づいた平均的な値として、大腿部 540mm、下腿部 360mm を用い、表面にはウレタンおよびゲルで構成する人工皮膚を装着した。なお、人工皮膚の粘弾性、摩擦特性等については、人体皮膚の再現を目標として検討を進めている。

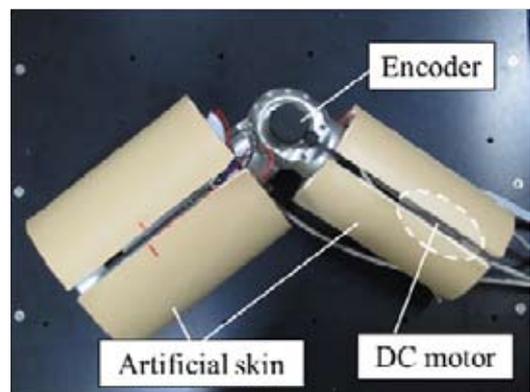


Fig. 2 Overview of the low leg dummy

次に、足部および腰部を含めた下肢ダミーを Fig. 3 に示す。足関節、股関節は一軸ジョイントで形成し、他動的に動作する。また、電動リフトによって腰部位置を操作することができる。なお、関節高さ、大腿、下腿長等は、人体データベース⁽¹¹⁾に基づいた平均的な値を用いた。



Fig. 3 Overview of the lower body dummy

4. 下肢ダミーを用いた実験と結果

本研究では、製作した下肢ダミーを用い、膝関節屈伸、起立着座動作を行い、その際の相互作用力を計測した。

4-1 膝関節単独での実験

膝関節屈伸の影響を検討するため、膝関節単独で屈伸実験を行い、その際に生じる相互作用力の計測を行った。実験装置の構成を、Fig. 4 に示す。横向きにした装着型ロボットに Fig. 3 で示した下肢ダミーの片足のみを取り付け、他動的に 10 回の膝関節屈伸を行った。その際、下腿カフに取り付けた力覚センサ(キスラー社製, 9602)により、下腿装着部に作用する作用力を計測した。

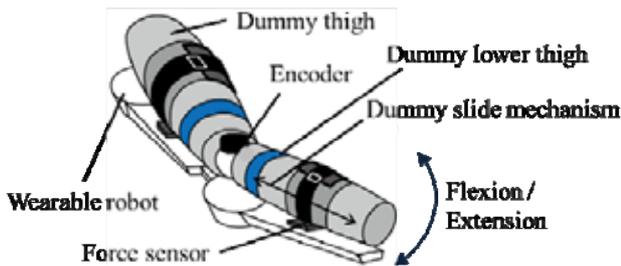


Fig. 4 Overview of the experiment condition

Fig. 5 に、関節角度に応じた回転中心-下腿装着部距離変化量と、その際の下腿作用力計測結果を示す。膝関節屈曲に伴い、作用力が増加していることが分かる。また、作用力の増加傾向が下腿変位量とは異なる傾向を示していることが分かる。これは、下腿伸長による作用力の増加が、矢状面上における大腿部のねじれによって吸収されたためではないかと考えられる。固定部はベルトによる固定であるため、腰部、大腿部の固定にもかかわらず、そうした動作が発生していることは目視でも確認された。

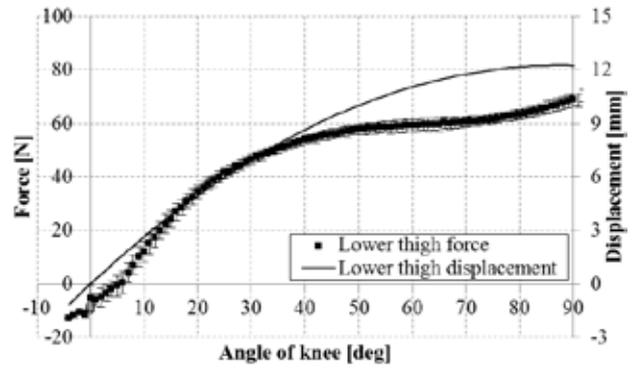


Fig. 5 Cuff force with lower thigh motion

次に、下腿部変位を伴わないケースにおける結果を以下に示す。本結果からは、下腿部変位が 10-40° 付近での作用力増加に影響していることが分かる。この結果は、人間工学的不整合が作用力を増大させる可能性を示唆している。

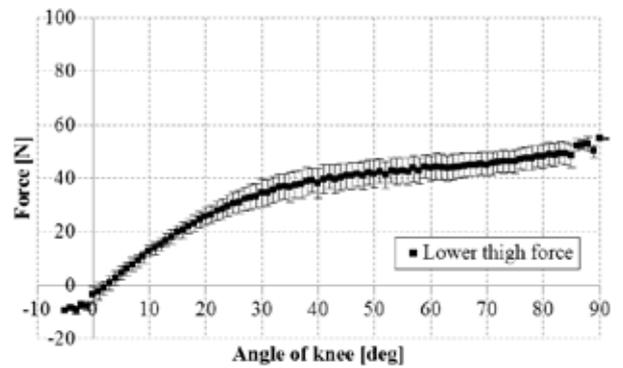


Fig. 6 Cuff force without lower thigh motion

4-2 起立着座条件での実験

装着型ロボットにおいて想定される使用方法である起立着座をダミーによって模擬し、その際の相互作用力を測定した。本実験においてはまず、装着型ロボットを装着したダミーを電動リフトによって直立させ、治具によって下腿部を垂直状態で固定した。次に、電動リフトによってダミー腰部を降下させながら後退させることで膝関節を屈曲させた。なお、作用力は 5 点の計測姿勢間で 10 回の繰り返し屈伸を行って計測した。その際、姿勢の再現性を高めるため、計測点においてはダミーを静止させ、姿勢を計測した上で作用力の計測を行った。

計測の結果を Fig. 7 に示す。下腿部長手方向作用力は、下腿部変位量および Fig. 5, Fig. 6 に示した膝関節単独屈伸実験における下腿部長手方向作用力のいずれとも異なる傾向を示している。

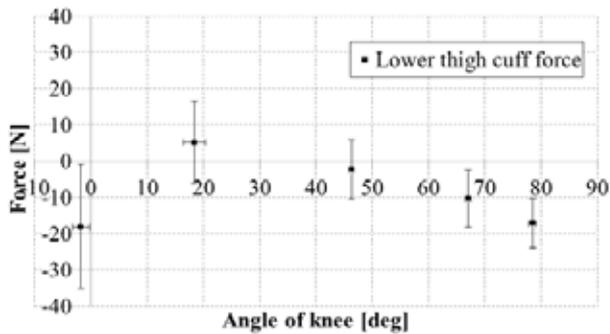


Fig. 7 Cuff force at sitting experiment

これは、姿勢の変化に伴い装着部に負荷される質量が変化する事による影響を受けたためと考えられる。横向きの試験では重力方向は矢状面に垂直方向であり、屈伸に伴う重力の影響は無視できるのに対し、起立着座実験では姿勢変更に伴い重力方向が矢状面内で変化する。そのため、装着部に横向き実験とは異なる負荷が作用し、作用力が変化したと考えられる。

また、起立着座条件においては横曲げ条件と比較すると発生作用力が著しく低下している。これについても、起立することで下腿にダミー質量が負荷されたことが影響していると考えられるが、さらなる検討を要する。

5. 考察

下腿ダミーを用いた作用力計測実験の結果からは、作用力が下腿変位の影響を大きく受けていることが示唆されている。一方で、計測姿勢の影響は大きく、安全性検証のためには実際の使用方法を再現した姿勢条件で検証を行う必要性が高いことが明らかとなった。

また、下腿部変位量が大腿固定部における変形を発生させた点は、各関節部における不整合が装着者—装着型ロボット間の装着部に複合的に影響してその位置関係を変化させることを示唆している。これは、装着部のずれを伴う人体各部の特性の計測および再現の重要性を示唆していると考えられる。特に皮膚特性は装着部のずれに大きく影響することから、その再現が必要とされる。

同時に、そうした装着者—装着型ロボット間の位置変化は矢状面上において多く発生すると考えられることから、矢状面上の位置関係の変化を伴う不整合の重要性が明らかとなった。なお、矢状面外においても大きな作用力を発生する現象についてはそれに応じた検証を行う必要があるが、その際には実際の使用条件を再現した統合的な試験に限らず、各要素に対応した個別の試験方法を考案することについて検討するべきである。

これらより、装着型ロボットの安全性検証試験においては、実際の使用条件を再現した上で負担の計測を行う必要があることが明らかとなった。また、矢状面上においては装着部における負荷およびずれが装着型ロボット—装着者位置関係の変化を通じて他の装着部に影響する事から、特にその重要性が示されている。

なお、安全性検証試験において用いるためには、皮膚の表面特性、変形などの、人体特性についても再現を進め、安全な範囲において人体装着時と一致した作用力発生傾向を示すダミーを開発する必要がある。

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) 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.
- (2) 神永拓, ファン・フン・ホアン, 田中宏和, 中村仁彦, “筋電位計測を補助的に用いた感度関数増大パワーアシスト制御,” ROBOMECH2011, (2011), 2P2-F02.
- (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 Esmaili, 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) 伊藤浩治, 山田陽滋, 大西惟史, 小田志朗, 原進, 岡本正吾, “下肢人間装着型ロボットの安全性評価試験方法に関する研究 一第 1 報: 膝ジョイント連動並進機構を有するダミーの提案—,” ROBOMECH2011, (2011), 2A1-A04
- (6) 山田陽滋, 本間敬子, 秋山靖博, 岡本正吾, 原進, “装着型ロボットの安全性評価試験方法の開発,” RSJ2011, (2011), AC2B1-4
- (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)