

装着型ロボットの安全性評価試験方法の開発

— 創傷リスクの見積もりのための滑り覚センサの開発 —

石黒 健次^{*1}, 山田 陽滋^{*1}, 秋山 靖博^{*1}, 原 進^{*1}, 岡本 正吾^{*1}

Development of a Safety Testing Method for Wearable Robots

— Development of a Slip Sensor for Estimation of Skin Wounds Risk —

Kenji ISHIGURO^{*1}, Yoji YAMADA^{*1}, Yasuhiro AKIYAMA^{*1},
Susumu HARA^{*1}, Shogo OKAMOTO^{*1}

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

Skin wounds risks are not negligible matters as well as burden to human joints while using a restrained-type physical assistant robot. But, skin wounds risks have not been investigated enough to evaluate the safety of the robot quantitatively. It was because contact points where skin wounds might be generated could not be observed with an ordinary sensor. Therefore, in this study, we developed a new slip sensor which was a 2D image sensor to detect the relative displacement between skin and cuff. Then, we proposed the method that can distinguish slip from skin stretch at the contact points by usage of slip sensor and motion capture system. As a result of these, we attained the acquisition of contact conditions at inside of cuffs.

Key Words : Physical assistant robot, Slip Sensor, Skin stretch, Contact safety

1. 緒 言

近年、社会の超高齢化進展に伴って、要介護者の生活の質の向上や労働者の生産性の向上を目的として研究が進められている人間装着型ロボットへの期待が増加している。しかし、現状では、安全に関する基準・技術・コスト等の課題が残されている。特に、安全要求を満たす技術課題を解決しなければ、装着型ロボットの活発な推進を行うことができず、早急な安全性評価方法の確立が求められている。これに関して、2009年にスタートした「生活支援ロボット実用化プロジェクト」の主要な事業活動の一部として、筆者らの研究グループは、装着型ロボットの安全性に注目し、リスクアセスメントを行って「ヒトの関節や皮膚の傷害」リスクを重視し⁽¹⁾、ロボットと装着者の人間工学的不整合のハザードを同定して、これらに対する安全性評価手法の開発を進めてきた⁽²⁾。

装着型ロボット（以下、ロボット）に関する安全要求事項は、国際安全規格 ISO 13482 としてまとめられつつあり⁽³⁾、上記プロジェクトの主な成果のひとつとしても位置づけられている。この ISO/FDIS 13482 の中で⁽³⁾、本研究課題に関わる規格文は第 5.6 節の安

全要求事項として取り上げられている「ストレス、姿勢、使用時のハザード」である。その a) 項として、「ロボットは、使用者が連続的にロボットを使用する中で、精神的肉体的なストレスや負担を与えてはならない。」と記載されている。また、妥当性確認の方法として、Measurement（計測）を含んでおり、本稿で述べる試験方法はこれに該当する。ロボットの技術的安全性確保の観点では、これが医療用途でも非医療用途でも要求事項の項目は、重なるところが大きいと想到される。しかし、上記規格の対象が、非医療用途の健常者のためのパーソナルケアロボットに限定されてきている⁽⁴⁾。このような動向の下で、ロボット使用時の比較的高いリスクを考えると、関節への負担に加え、繰り返し運動に伴うカフ装着部の皮膚への負担が大きいと見積もることができる。しかしながら、創傷リスクの定量的な評価は十分に行われておらず、その要因として、創傷が生じる接触部の外部からのモニタリングが困難であることが挙げられる。

本稿では、装着型ロボット使用時の創傷のリスクの評価方法として、装着部の皮膚の挙動に着目した試験方法の提案を行う。そして、カフと人体表面の間の接触状態の精緻な検知に貢献する要素技術として、滑り覚情報の取得が可能なセンサの開発について言及し、

^{*1} 名古屋大学工学研究科機械理工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市中種区不老町 ishiguro.kenji@f.mbox.nagoya-u.ac.jp)

その適用事例を示す。

2. 接触安全性評価試験方法

2.1 創傷評価における検討事項 装着型ロボット実用化促進の観点を踏まえると、安全性検証試験方法は、装着者のリスクを定量的に評価できる必要がある。創傷の中でも水疱は最も軽微な機械的刺激に対して発現する傷害の一つであり⁽⁷⁾、繰り返し加えられる応力に起因する有棘細胞の壊死が原因で表皮内に裂け目が生じることにより形成される。そのため、外的刺激としての摩擦力の大きさだけでなく、これが繰り返し加わる負荷としての回数を考慮した評価が必要となる。

また、人体部位の表面形状とカフの形状の不一致による片当たり、あるいは、人体の表面が弾性体であることによりカフと人体との接触部において応力分布が生じ、一律の摩擦力で表現することが不可能となる。言い換えると、カフ表面における人体表面との接触力が一様でなくなるため、カフと皮膚が固着した状態で皮膚が変形している部分とカフと皮膚が相対的に変位する滑り部分が生じる。したがって、創傷リスクの評価に、皮膚の変形および滑りを陽に考慮した妥当性確認試験ができることを念頭に置いて試験方法の検討を行った。

2.2 試験概要および装置の構成 ベルトや靴を使用して下肢に固定した状態で使用する装着型ロボットに対して、本試験は適用される。図1は、試験方法および筆者らが構築してきた装置の構成を示したものである。まず、同図左に示すように、モーションキャプチャおよび、人間が装着するロボットのカフに取り付けるセンサシステムを用いて、ロボットのカフ装着部位と人体の相対変位データおよび接触力データを取得する。そして、得られたデータを分析し、カフの人体接触部における変位、接触力パターンを作成、記録する。つづいて、記録されたカフの変位を同図右側に示すように、多層構造の人工皮膚ダミー上の変位として再現

する。カフの変位の再現には、研究開発用のロボットマニピュレータ（安川電機製 MOTOMAN-HP3J）を用いる。そして、このカフの運動に沿って、皮膚ダミー内で発生した分布状のカベクトルを、ダミー用のセンサシステムの方覚センサによって検出し評価を行う。

3. 人体計測システム構成

3.1 カフの変位計測 カフ接触部の皮膚への負荷をダミー上で再現するため、人体骨格に対するカフの変位の計測が必要となる。カフの変位計測にはモーションキャプチャ装置 (Motion Analysis 社製 MAC 3D System) を用いる。図2 (a) に示すように、人体の軸を表す骨座標 Σ_B とカフ中心部を表すカフ座標系 Σ_C を導入する。各座標系はそれぞれ取り付けられたモーションキャプチャマーカにより定義され、 Σ_B の構成に用いられるマーカ群は、下腿部においては筋肉や脂肪の少ない脛骨付近に塗布する。大腿部においては比較的皮膚の変形の少ない前面部の大腿直筋付近にそれぞれ塗布する。これらの地点は運動中において骨に対する変位の比較的小さい場所であり、骨格の運動を表すマーカの塗布位置として適すると判断した。

図2 (b) に示すように、時間 $[0, t]$ の間の Σ_B 上でのカフ中心部の変位を $\mathbf{r}(t)$ 、姿勢の変化を $\mathbf{R}_o(t)$ と表す。 $\mathbf{r}(t) \in \mathbf{R}^3$ 、 $\mathbf{R}_o(t) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ であり、これらは運動時における Σ_B から見たカフの変位を表す。

3.2 滑り覚情報の取得 カフの人体表面との接触運動時に生じる状態の変化は、皮膚の変形と滑りである。つまり、カフが人体に与える負担を忠実に再現するためには、カフの変位の大きさのみならず、接触状態として皮膚の変形および滑りを定量的に取得する必要がある。本研究では滑り覚情報の取得が可能なセンサの開発により、接触状態の変化の高精度な検出を行う。すでに、ロボットハンドの把握動作の制御等の分野で、滑り覚センサの開発は報告されているが⁽⁸⁾⁽⁹⁾、人体のような柔軟な対象面への適用実績は少ない。装

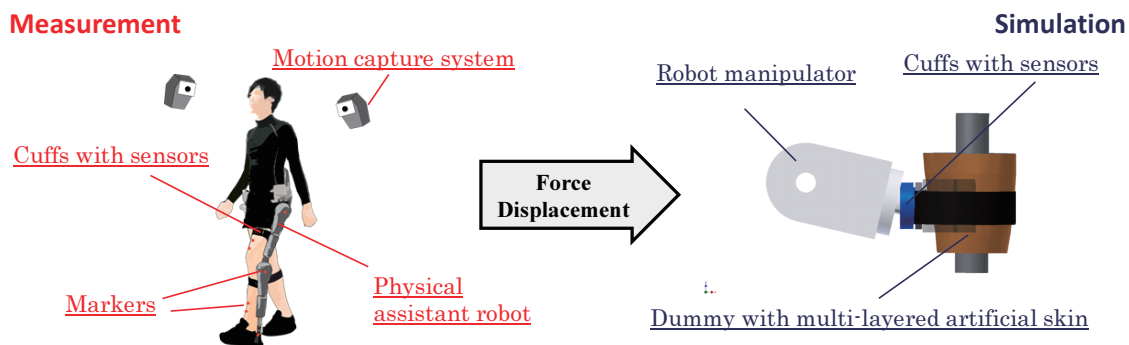


Fig. 1 Apparatus of proposed testing method

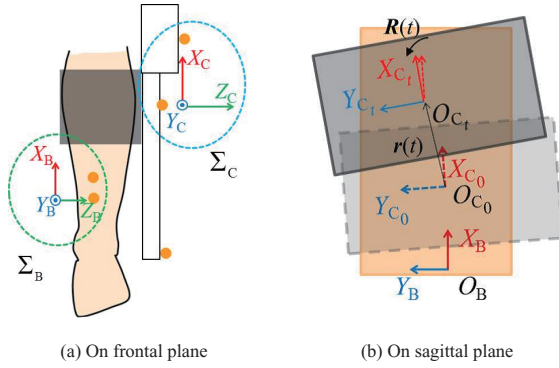


Fig. 2 Coordinate systems

着型ロボットに搭載する場合、滑り覚センサは、接触面の影響を受けにくいように非接触の検出原理のものが望まれる。また、カフ内側面に接する皮膚とカフとの滑り量を検出するために、カフに組み込むことのできるサイズであること、さらに、高い周波数特性と分解能を持つことがあわせて要求される。

上記の項目を考慮して、本研究ではイメージセンサと集光レンズ (Avago technologies 製, ADNS-9500, ADNS-6190-002) を用いた滑り覚センサの開発し、カフに搭載した。イメージセンサは、画像相関を用いて移動距離の検出を行うタイプのものであるため、非接触で実現でき、かつ高精度の変位の計測に適している。

滑り覚センサを図3に示す。そのサイズは $24 \times 22 \times 15 \text{ mm}$ であり、カフを加工することで、カフに搭載することのできる機構を持つ。また、滑り覚センサはその機能として、接触面によって定義される2自由度の変位を時系列で出力することが可能である。センサの座標系 Σ_S で見た、時刻 $[t - \Delta t, t]$ 間の滑り ${}^S \mathbf{r}_{slip}(\Delta t) = ({}^S x_{slip}(\Delta t), {}^S y_{slip}(\Delta t))^T$ を取得することができる。ただし、その周波数は最大で 1000 fps まで変更可能である。

3.3 皮膚変形量の算出 Σ_B に基づいたカフの変位(カフの変位)、 Σ_C に基づいた皮膚表面の相対変位(滑り)、および Σ_C に基づいた相互作用力を計測するため、図4に示すように、3.2で述べた滑り覚センサおよび3軸力覚センサ(テック技販製, USL06-H5-500N)を搭載したセンサシステムを構築した。ロボットリン

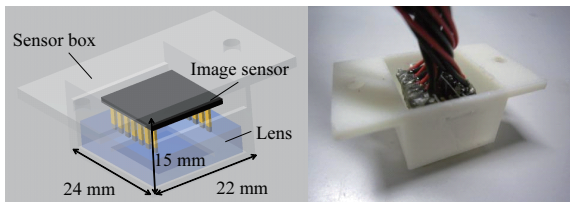


Fig. 3 Slip sensor

クの長軸に沿った上下位置に滑り覚センサを配置する。滑り覚センサの配置理由については以下の通りである。図4に示すように、センサシステムの基準座標系を長軸方向に X 軸、前後方向に Y 軸、皮膚に対して垂直方向を Z 軸と定義すると、装着型ロボット使用時には歩行や起立着座運動といった $X-Y$ 平面(矢状面)内での運動が支配的であり、人体とカフの不整合は矢状面内に現れる。そこで、 X 軸および Y 軸方向の接触力ならびに相対変位を計測することが可能であること、また Z 軸まわりの回転を正確に計測する能力が必要となる。そこで、複数の滑り覚センサを用いることで、その速度成分から瞬間回転中心を算出し、矢状面内での3自由度の滑りのセンシングを可能とする。

次に、カフの変位および滑りの計測結果から、皮膚の変形量を計算する方法について述べる。皮膚変形を直接計測する方法には、MRI, 超音波プローブ等を用いた方法があるが、これらは静止状態で適用することが原則であり、装置の規模からカフ部への実装は困難である。また、変形と同時に滑りが発生するため、カフの変位、滑りから間接的に算出する方法が妥当であると考えられる。

カフの中心部に定めた座標系 Σ_C から見た滑り覚センサ Σ_S 原点の位置ベクトルを ${}^C \mathbf{r}_S = (p_x, p_y)^T$ とすると、カフが Σ_B 上で運動する際の Σ_B から見た滑り覚センサの位置 ${}^B \mathbf{r}_S(t) = (x_S(t), y_S(t))^T$ は、 Σ_B に対する同時変換行列 ${}^B \mathbf{T}_C$ を用いて以下の通り表される。

$$\begin{pmatrix} {}^B \mathbf{r}_S(t) \\ 1 \end{pmatrix} = {}^B \mathbf{T}_C \begin{pmatrix} {}^C \mathbf{r}_S \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta(t) & -\sin \theta(t) & x(t) \\ \sin \theta(t) & \cos \theta(t) & y(t) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

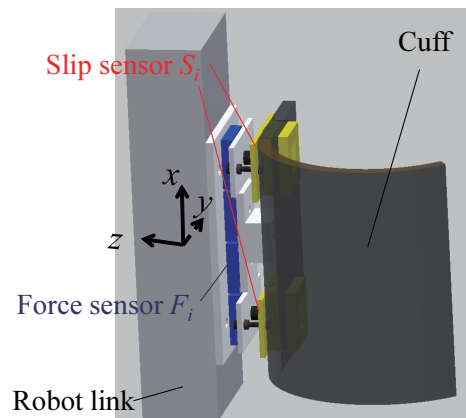


Fig. 4 Sensor system of human

ただし、矢状面上でのカフの並進変位を $\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t))^T$, 回転角を $\theta(t)$ とした. 次に, Σ_B 上での時刻 t までに生じた滑りを ${}^B\mathbf{r}_{slip}(t) = ({}^Bx_{slip}(t), {}^By_{slip}(t))^T$ とすると,

$${}^B\mathbf{r}_{slip}(t) = \sum_{t_j=0}^t \begin{bmatrix} \cos \theta(t_j) & -\sin \theta(t_j) \\ \sin \theta(t_j) & \cos \theta(t_j) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_{xslip}(\Delta t_j) \\ S_{y_{slip}}(\Delta t_j) \end{pmatrix} \quad (2)$$

したがって, 時刻 t における Σ_B から見た皮膚の移動量, すなわち皮膚の変形量 ${}^B\mathbf{r}_{stretch}(t) = (x_{stretch}(t), y_{stretch}(t))^T$ は以下の式で算出することが可能となる.

$${}^B\mathbf{r}_{stretch}(t) = {}^B\mathbf{r}_S(t) + {}^B\mathbf{r}_{slip}(t) \quad (3)$$

現状, カフと人体の不整合より状態の変化として, 滑りおよび皮膚の変形を独立に取得した報告はない. 滑り覚センサの導入により, これらを定量的に検出することを可能にした点に本研究の新規性がある.

4. 滑り覚センサの精度評価

4.1 測定機器・方法 開発した滑り覚センサによる滑り状態の検出精度に関する評価を行った. 評価項目は, 並進滑り距離, 回転滑り角度および回転中心の検出である. また, 滑り状態検出処理の遅れに関する評価も行った. 繰り返し位置決め精度 0.03 mm のロボットマニピュレータを用いて, 各測定につき, 図5に示すように, それぞれ一定量の接触運動を発生させる. 検出対象の接触面は人体皮膚にその表面特性が類似したゴム (Misumi, AMSE) を使用した人工皮膚プレートを用意した. 並進滑りおよび回転滑りについては, 10 mm の並進運動と 10 deg の回転運動が同時に与えられる際に検出される滑り距離および回転角度をもって評価を行う. 回転中心の比較については理論値との類似性により評価を行う. 滑り状態検出処理の遅れについては実際に人体で生じるスティックスリップを模擬するために, 図5の右の図のようにばねを用いた機構を作製し, その滑り速度により評価を行う. すなわち, ばねを用いて滑り状態を含む接触運動を再現することで, 固着から滑りへ移行する状態変化の検知が可能であるかを確認する. 本項目においてはモーションキャプチャにより測定したカフと人工皮膚プレートとの相対速度を参照値とする. 各項目とも10回の測定を行う. 測定結果は平均±標準偏差で示す.

4.2 検出結果 滑り距離および回転角度の測定結果を図6に示す. 滑り覚センサで検出した滑りは $9.2 \pm 0.28 \text{ mm}$ となった. また, 回転角度は $10 \pm 0.40 \text{ deg}$ となった. 回転滑りについては, 与えた回転角度の大きさと同程度の検知がされており, その精度が確認さ

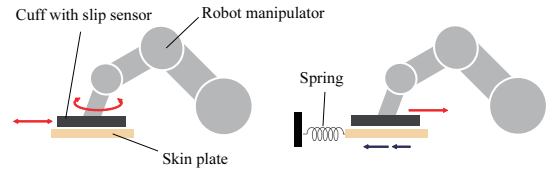


Fig. 5 Evaluation of accuracy

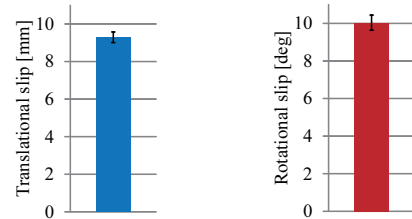


Fig. 6 Evaluation of accuracy (translation and rotation)

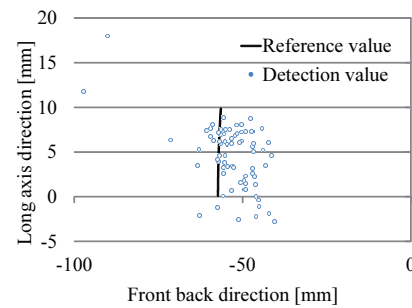


Fig. 7 Evaluation of accuracy (Instantaneous center)

れた. 一方で, 並進滑りについては検出された滑り距離が短くなる傾向にあった. ただし, 並進運動のみを与える動作を行った際において, 検出された並進滑りは $10 \pm 0.12 \text{ mm}$ であった.

検出された瞬間回転中心を参照値と併せて, 図7に示す. 参照値は, 滑り覚センサが人工皮膚プレートと完全に滑る場合の回転中心の軌跡である. 本来の瞬間回転中心と比較して, 前後方向へのばらつきが大きい. これは2台の滑り覚センサが上下方向に配置されており, 前後方向への検出誤差に対する感度が比較的高くなっている理由によると考えられる. この問題はセンサの配置を再考することで改善される. また, 参照値に類似した傾向を示しており, 前述した並進および回転運動の結果と併せて, 滑りの傾向を把握することが可能であることが分かった.

滑りタイミングの測定結果を図8に示す. 滑り覚センサで取得された滑り速度波形は, モーションキャプチャデータと同様にスティックスリップ状態を検知できており, その間隔や速度の大きさも同程度である. モーションキャプチャデータと比較した場合, 滑り覚センサにはその速度波形に時間遅れが生じているが,

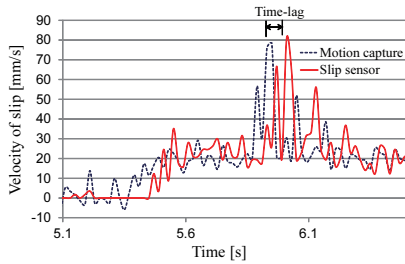


Fig. 8 Evaluation of accuracy (Timing)

各試行において、その最大速度の時間遅れを計算したところ 0.08 ± 0.006 s であった。偏差を考慮すると、この時間遅れはセンサシステムがもともと持っているものであると考えられる。データ取得後の補正処理がおよそ可能であることから、検出処理に要する遅れは許容できるものと判断する。

5. カフ接触状態の検出

5.1 測定方法 3章で説明した人体計測システムを用いて、ロボットを装着した状態で動作した際の下腿カフ部のずれおよび滑りの計測を行った。本稿では立ち座りを対象動作とする。起立姿勢から動作を開始し、起立-着座と膝関節の屈曲、伸展を繰り返す動作を基準に測定を行った。

5.2 結果 モーションキャプチャにより測定されたカフの変位を図9(b)に示す。カフに搭載されている各滑り覚センサの位置の Σ_B 上における変位を示しており、その表記方法は(a)に従う。横軸はY軸、縦軸はX軸に対応しており、矢状面上での初期位置からの変位を示している。同図より、Y軸方向と比較して、X軸方向への変位量が小さいことが分かる。Y軸方向に関しては、カフ部分で固定はされているもののベルトが変形するために、人体の運動に伴って、カフも前後に変位する結果となった。図10にカフのY軸方向変位の時系列データを示す。横軸は屈曲開始時刻からの時刻であり、 $t = 3.20$ s で屈曲姿勢、 $t = 6.16$ s で起立姿勢をとった。同図より、Sensor 1の変位量がSensor 2と比較して常に大きいことが読み取れる。これらはカフにおいてSensor 1が外周となる回転変位の発生を示唆している。これは、足部において、人体とロボットの靴により固定されているため、立ち座りという動作が繰り返される間における、カフのX軸方向の変位は小さくなったためである。

次に、滑り覚情報を用いて算出した皮膚の変形量を図11に示す。検出された滑り量はSensor 1の位置においては最大で4 mm程度、Sensor 2の位置においては1 mm程度となった。これを式(3)に基づいて補正

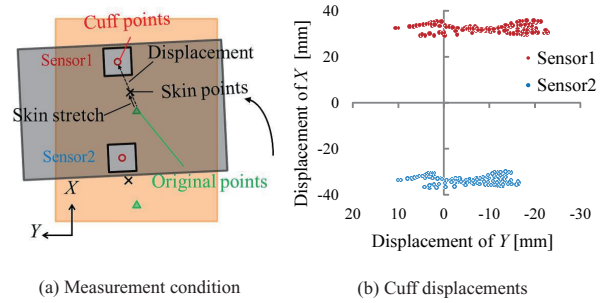


Fig. 9 Result of cuff displacement

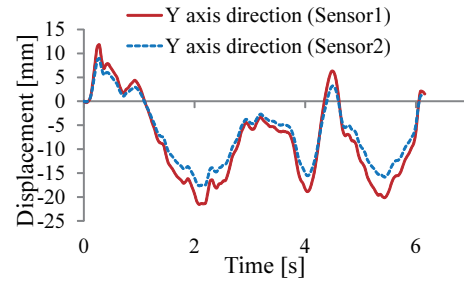


Fig. 10 Cuff displacement

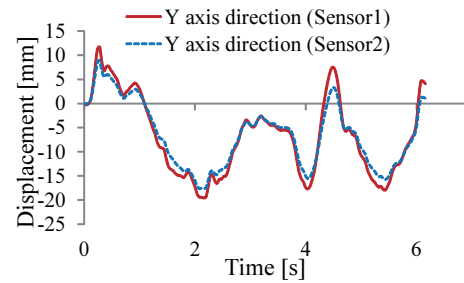


Fig. 11 Skin stretch

した皮膚の変形量は、カフの変位量と比較してはるかに小さく、結果として、カフの変位に起因して生じる状態の変化は、皮膚の変形が支配的であることが確認できた。

5.3 考察 測定結果より、立ち座り動作時におけるカフ接触状態の解明を行う。図12は、時刻 $t = 1 \sim 3$ s におけるカフの変位量と皮膚の変形量を比較したものである。Sensor 1の位置ではカフの変位の増大に伴って滑りが生じており、皮膚の変形量が減少している(絶対値が小さくなっている)。一方で、Sensor 2部分では滑りが生じず、皮膚の変形量がカフの変位と同程度であるため、Sensor 1の傾向がSensor 2に近づいている。これを実際に生じる状態の変化として考えると、カフ全自体は人体に対して回転運動をするのだが、カフの変位の増大に起因して局所的にSensor 2を中心とするような回転滑りが生じる。それゆえに、Sensor 1の位置においてもSensor 2の位置の皮膚の変形量と同程度になり、見かけ上、固着部分では並進運

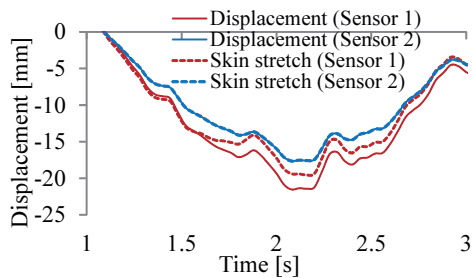


Fig. 12 Influence of slip (decrease of skin stretch)

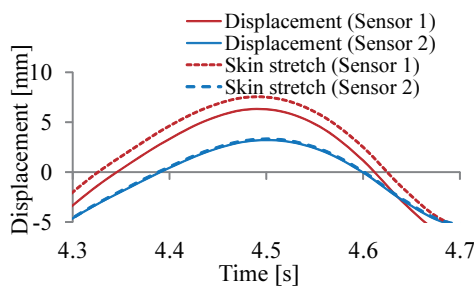


Fig. 13 Influence of slip (increase of skin stretch)

動に近い動きをする。したがって、カフ接触部において平行な応力が働いていると考えることができる。

また、図 13 には、時刻 $t=4.3\sim 4.7$ s におけるカフの変位量と皮膚の変形量を比較したものを示す。同図では Sensor 1 の位置において、カフの変位より皮膚の変形量が上回っている。これは、時刻 $t=1\sim 3$ s で滑りが生じた後、固着状態を保持したまま反対方向へ変位したために、滑りの分だけ皮膚の変形量が増加したと考えられる。本測定ではカフの変位の大半が皮膚の変形となったが、必ずしも比例の関係にあるのではなく、滑りの生じるタイミングによりその増減が左右されることが確認された。

以上のように、従来の方法では検出することのできなかったカフの滑りおよび皮膚の変形といった接触状態は、開発したセンサシステムを使用することでモニタリングが可能となった。

6. 結 言

本稿では、人間装着型ロボットの接触安全性に関する評価に有用な人間-ロボットカフ間の接触運動を計測することができる滑り覚センサの提案を行い、開発したセンサシステムの基本的な機能とその性能について報告した。精度評価を行った結果、滑り覚センサが剛体上においてはカフと対象面との 3 軸相対運動を精度よく取得することが出来ることを明らかにした。また、モーションキャプチャデータとの併用により、人体とカフの相対運動を皮膚の変形および滑りとで識別

する方法を提案した。提案したセンサシステムを用いて、人体上で生じるカフの接触状態を検出した結果、カフの変位に伴って生じる状態変化として皮膚の変形が支配的であることが明らかとなった。

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。本研究の開始にあたり技術的な助言と討論を頂いた北川秀夫氏 (岐阜高専) に感謝の意を表す。また、本研究チームのコンソーシアムメンバーである諸氏に感謝の意を表す (所属略)：河上敬介氏、磯貝香氏、富永敬三氏、平野裕滋氏、石原正博氏、伊藤寿美夫氏。

参 考 文 献

- (1) 伊藤浩治, 山田陽滋, 大西惟史, 小田志朗, 原進, 岡本正吾, “下肢用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 - 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 -”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 講演会 CD-ROM, 2A1-A04, 岡山, 2011.
- (2) Yasuhiro Akiyama, Yoji Yamada, Koji Ito, Shiro Oda, Shogo Okamoto, Susumu Hara, “Test Method for Contact Safety Assessment of a Wearable Robot -Analysis of Load Caused by a Misalignment of the Knee Joint-”, Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 539-544, 2012.
- (3) ISO/FDIS 13482, “Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots”, 2013.
- (4) 山田陽滋, “サービスロボットの国際安全規格 (ISO13482 「パーソナルケアロボット」) 紹介”, ロボット, 211 号, pp.14-17, 2013.3.
- (5) L. Kanerva, “Mechanical Causes of Occupational Skin Disease”, in *Handbook of Occupational Dermatology* eds. by L. Kanerva, et al., pp.157-162, 2000.
- (6) Naylor PFD. “Experimental friction blisters”, *British Journal of Dermatology*, Vol.17, 10(1955), pp.327-342.
- (7) Marion B Sulzberger, Thomas A Cortese Jr, Leonard Fishman, Hugh S Wiley, “Studies on Blisters Produced by Friction I. Results of Linear Rubbing and Twisting Technics”, *The Journal of Investigative Dermatology*, Vol.47, No.5(1966), pp.456-465.
- (8) 長南功男, 北川秀夫, 黒田敏秋, 松田文夫, 服部秀三, “レーザ散乱光を用いた距離・すべり複合センサ”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.8(1993), pp.1197-1202.
- (9) 山田陽滋, マーク R. カトコウスキー, “3 軸力覚・振動覚を有する触覚センサの開発と物体の並進・回転滑り識別への応用”, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 4, pp. 539-544, 1995.