

装着型ロボットによる創傷リスク見積もりのための 妥当性確認試験装置の開発

吉田 剣吾^{*1}, 山田 陽滋^{*1}, 秋山 靖博^{*1}, 原 進^{*1}, 岡本 正吾^{*1},

Development of A Safety validation Test Equipment for Severity Estimation of Wounds Caused by Physical Assistant Robots

Kengo YOSHIDA^{*1} and 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

Severity of skin wounds is also not negligible in the use of physical assistant robots, when it is combined with the frequency. And it is necessary to establish a safety validation test method by which the severity is estimated. We developed a safety validation test equipment for reproducing the cuff motion which was originally monitored on the limb side of a person who used a physical assistant robot in standing/sitting motions. We designed a control system with an IFT(Iterative Feedback Tuning) optimization technique for the reproduction of cuff motion on a dummy skin side. We demonstrated the optimization was achieved by showing the cuff motion was optimally reproduced in that both relative displacement and interactive force exerted at the contact point on the cuff were similar to the originally monitored ones. We evaluated the reproduction performance and discussed future improvement for real-time control performance.

Key Words : physical assistant robot, safety validation test, wounds, motion reproduction, IFT optimization

1. 緒 言

1.1 人間装着型ロボットの安全 近年の超高齢社会の進展に伴い、要介護者の生活の質の向上や、生産現場における作業効率の向上を目的として、装着型ロボットの研究・開発が進められており、その期待が高まりつつある。しかし現状ではコストや、技術、安全に関する基準などの課題があり、特に、安全に対する技術的な課題⁽¹⁾を解決することが、装着型ロボットの活発な推進・普及のためには必要である。筆者らの研究グループは、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、装着型ロボットの安全性に注目し、リスクアセスメントにより「ヒトの関節や皮膚の傷害」リスクを重視⁽²⁾してきた。そして、ロボットと装着者の人間工学的不整合によるハザードを同定し、これらに対する安全性評価手法の開発を進めてきた⁽³⁾。その成果として装着型ロボットに関する安全要求事項は、国際安全規格 ISO13482⁽⁴⁾としてまとめられた。この ISO13482 の

中で、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なかで精神的・肉体的負担を与えてはならない。」と記載されており、また、上記規格の対象が、非医療用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。

1.2 現時点で必要な安全性 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に至るハザードを見積もると、規格の信頼性要求（機能安全）に関わる安全性、あるいはさらに一般の機械安全の枠組みで議論される安全性に関わるハザードのほかに、新たに、人間-ロボット系の人間工学的な不整合が挙げられる。これについて、人間が受ける傷害として、関節への負担や皮膚の損傷として発現するものが対象であることがリスクアセスメントの結果得られる。これらの中で、関節への負担については、今後の参入メーカーを含め、本業界技術の普及動向に注目する必要があるが、受動的な調節機構を設けている、あるいは着用衣服の上から装着するという通常の使用方法から考えて、

^{*1} 名古屋大学工学研究科機械理工学専攻 (〒 464-8603 愛知県名古屋千種区不老町)yoshida.kengo@e.mbox.nagoya-u.ac.jp

現状は大きなリスクとして考慮に値せず、加えて、事故の報告もされていない。これに対し、創傷リスクは、一般的な固定方法の装着型ロボットであれば、筋骨格等の関節内部への傷害に先んじて皮膚損傷が発生すると想定される。リスクアセスメントの結果、装着型ロボットの使用において最も発生しやすい傷害のリスクであると筆者らの研究グループは考えている。また、皮膚に加わる力と不快感の関係についての研究⁽⁵⁾も安全性評価を目的として行われており、皮膚の創傷リスクは、十分考慮に値するとわれわれは判断している。

本稿では、装着型ロボット使用時の接触部（カフ）の繰り返し運動に伴う創傷リスクの評価方法として、われわれの研究グループがすでに提案した接触安全性試験方法のうち、人体の皮膚特性を模擬したダミーに上におけるカフ運動の再現方法を示す。

2. 接触安全性試験方法

2.1 試験方法の概要 本研究では、安全性検証試験方法の対象として、水疱に注目する。これは、創傷の中でも比較的小さい機械的刺激に対して発現する傷害の一つであり⁽⁶⁾、繰り返し加えられる応力によって形成されると考えられる。事実 1950 年代の報告によれば、水疱の発生には摩擦力と共に、その摩擦力の加わった回数が影響し、その二つの要素の間には逆相関の関係が成立すると表現されている⁽⁷⁾。

これを受けて我々は、カフ装着時の安全性に対する妥当性確認の試験をするために、機械刺激として摩擦力の大きさだけでなく、これが負荷として加えられる場合の繰り返し回数も評価に加える。

本研究で開発した接触安全性試験方法を示す。本研究で提案する試験方法は、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適用される。図 1 は妥当性確認の試験方法及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、装着型ロボットを使用者が着用したまま運動を行っている段階で、以下に述べるカフの運動の変量を計測する。すなわち、計測するカフの運動の変量は人体皮膚の接触部に設けられた基準座標系に対する相対的な変位と、接触部における相互作用力である。計測にあたってはモーションキャプチャ及び、装着するロボットのカフにあらかじめ取り付けられた力覚センサシステム⁽⁸⁾を用いる。

続いて、人体との相互作用から計測されたカフの運動の変量は同図右に示すように、ロボットマニピュレータを用いてヒトの下肢形状・皮膚特性を再現したダミー⁽⁹⁾上で、やはりダミー皮膚とカフとの相対変位及び相互作用力として再現される。ダミー皮膚上にお

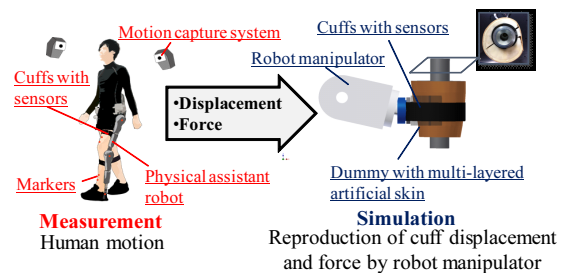


Fig. 1 Procedure of the safety validation test method

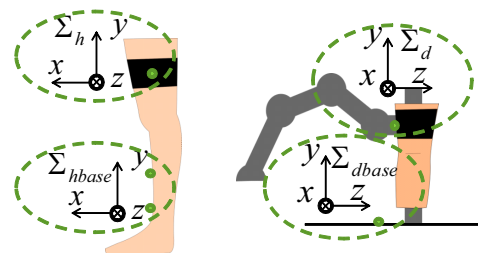


Fig. 2 Coordinate frames of force and displacement

けるカフの運動再現のために、ロボットマニピュレータのエンドエフェクタ部には、力覚センサが内側（ダミー皮膚側）に取り付けられたカフが搭載されている。以上の準備の下で、使用者が装着型ロボットを着用した時と同様に、大腿部を模擬して製作されたダミーに対してベルトを用いてカフを固定する。そして、人体とカフの間で計測されたカフ運動の変量が、ダミー皮膚に対するカフの運動として再現されるようなカフの運動を、ロボットマニピュレータを操作する事で生成する。ダミー上で生成するカフ運動としては、人体上で計測された目標値に近付けるために、変位と相互作用力の両方を対象として最適化した時系列パターンを生成する。その後、生成されたカフ運動をダミーに対して繰り返し与え、カフ運動によってダミーの皮膚に発生した力ベクトルを計測する。そして、豚の皮膚に対して別途検証を行いつつある、創傷の発生しない応力、繰り返し回数、計測された力ベクトルの比較を通して、対象となる人体-カフ系の安全の妥当性確認を行う。

3. カフ運動のダミー皮膚上での再現・生成手法

3.1 カフ運動の定義 本研究・試験方法で安全性の対象となるカフの運動は 2.2 節で述べたように、接触部における人体・ダミー皮膚間の相対変位と相互作用力を変量として定量評価しなければならない。カフ運動の変量の計測・再現に対し、人体・ダミーのそれぞれに図 2 に示す座標系を設けた。同図左は、人体に対して設けた座標系であり、 Σ_{hbase} は人体の軸を

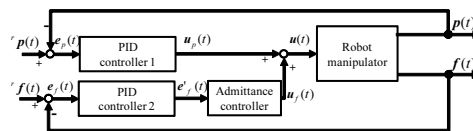
表す骨座標系, Σ_h はカフの中心部を表す座標系である. 人体上におけるカフの変量は, Σ_{hbase} を基準座標とし, Σ_{hbase} からみた Σ_h として計測される⁽⁸⁾. 次に, 同図右はダミーに対して設けた座標系である. 本試験ではダミーはベースに固定されており, ベースの座標系 Σ_{dbase} を基準座標として, カフの中心部 (エンドエフェクタ先端) の座標系 Σ_h をカフ運動の座標系としている.

そして, 定義した軸に沿ってカフの運動変位は x, y の2軸, 相互作用力は3軸に分けて計測・再現を行う. 人体・ダミー上で計測される相対変位, 相互作用力はそれぞれ, 人体上では ${}^h\mathbf{p}$, ${}^h\mathbf{f}$, ダミー上では ${}^d\mathbf{p}$, ${}^d\mathbf{f}$ と表す.

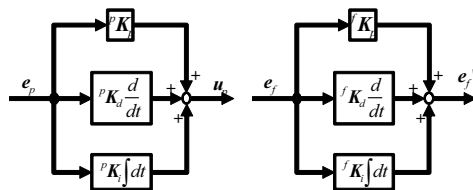
本研究では, ダミー皮膚上でのカフ運動の再現のために, 図. 2 に示すロボットマニピュレータ (安川電機製 MOTOMAN-HP3J) を用いる. これは, 速度制御によって運転される. したがって, 人体から計測された変量に基づいて制御されるマニピュレータの制御量は速度情報に変換される必要がある. 本研究では, その変換を, ダミー皮膚の粘弾性パラメータから換算された剛性係数 \mathbf{K} , 及び粘性係数 \mathbf{C} と, さらに接触点のダミー皮膚の仮想質量 \mathbf{M} を用いたアドミッタンス制御によって達成する.

3.2 カフ運動の再現・生成のための最適化 カフ運動を生成するためのマニピュレータの制御システムを設計する段階で, 相対変位と相互作用力の再現に関する, 最適化を議論しなければならない. カフ運動の再現対象であるダミーの人工皮膚の粘弾性 \mathbf{K} , \mathbf{C} は, 当該部位における人体の皮膚特性に類似した値でモデル化している. そして, 安全妥当性確認の上で, ダミー皮膚の周りに豚の皮膚を取り付けカフの運動を加えることになる. そのため, 制御システムにはロバスト性が要求される. そこで, 本研究では, Iterative Feedback Tuning (IFT)⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を導入した.

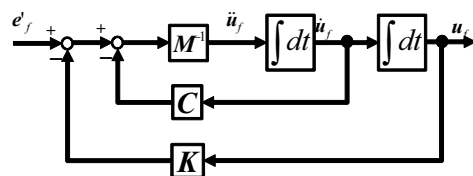
図. 3(a) に本研究のカフの運動をダミー皮膚上で再現する制御システムを示した. 同図 (b) は, 人体上のカフ運動から計測された変量とダミー皮膚上でカフ運動を再現した時に計測される変量の誤差に対して適用した PID 制御を示している. 本研究の最適化は, 入力変量に対する位置誤差・力誤差に対して用いる PID 制御のゲインを変化させることにより達成する. また, 同図 (c) は, 力信号を, マニピュレータに inputs 可能な速度信号へと変換するアドミッタンス制御システムを示している. 本制御システムにおける各パラメータは表. 1 に示すよう定義した.



(a) control system



(b) PID controller1,2



(c) Admittance controller

Fig. 3 Control system

Table 1 Parameters of control

${}^r\mathbf{p}$ [mm]	Reference position
${}^r\mathbf{f}$ [N]	Reference force
\mathbf{p} [mm]	Result position
\mathbf{f} [N]	Result force
${}^p\mathbf{K}_p \in R^{3 \times 3}$	P gain for position
${}^p\mathbf{K}_i \in R^{3 \times 3}$	I gain for position
${}^p\mathbf{K}_d \in R^{3 \times 3}$	D gain for position
${}^f\mathbf{K}_p \in R^{3 \times 3}$	P gain for force
${}^f\mathbf{K}_i \in R^{3 \times 3}$	I gain for force
${}^f\mathbf{K}_d \in R^{3 \times 3}$	D gain for force
$\mathbf{M} \in R^{3 \times 3}$ [kg]	Mass of dummy skin
$\mathbf{C} \in R^{3 \times 3}$ [N · s/mm]	Viscous damping
$\mathbf{K} \in R^{3 \times 3}$ [N/mm]	Spring constant

3.3 IFT による最適化 Iterative Feedback Tuning (IFT) は, 制約条件の下で逐次二次計画法に基づく最適化を行うことができる適応制御である. 実験を繰り返し行い得られた結果を, 入力に加味することによって, PID ゲインを最適化する⁽¹⁰⁾. 本研究における IFT は図. 4 に示す手順に従って行われる.

本研究では, 同図に示す, IFT により調整するパラメータを位置・力に対して用いた PID 制御の PID ゲ

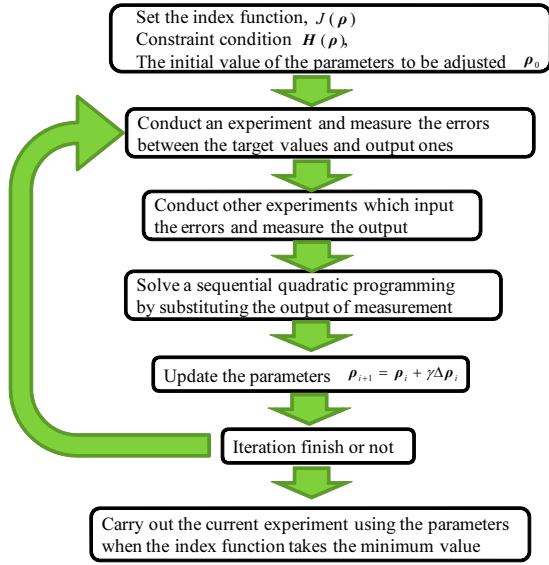


Fig. 4 Chart of the IFT control

インとしている。

$$\boldsymbol{\rho} = \left[{}^p K_{pl} \ {}^p K_{dl} \ {}^p K_{il} \ {}^f K_{pl} \ {}^f K_{dl} \ {}^f K_{il} \right], l = x, y, z \quad (1)$$

評価関数 J は式 (2), 制約条件 $\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2$ は式 (3), (4) のように定めた。評価関数は、位置と力の目標値との誤差に対して、それぞれ重みを与えたものとし、制約条件は位置と力の目標値との誤差に対して許容可能な最大値を設定することにより定義した。また、調整パラメータ γ を用いて、IFT による PID ゲインの変化量の調整を行っている。

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{ \mathbf{e}_p^T(t, \boldsymbol{\rho}) \mathbf{w}_p \mathbf{e}_p(t, \boldsymbol{\rho}) + \mathbf{e}_f^T(t, \boldsymbol{\rho}) \mathbf{w}_f \mathbf{e}_f(t, \boldsymbol{\rho}) \} \quad (2)$$

$$\mathbf{h}_1(t, \boldsymbol{\rho}) = \begin{bmatrix} |e_{px}| \\ |e_{py}| \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{pxmax} \\ e_{pymax} \end{bmatrix} \leq \mathbf{0} \quad (3)$$

$$\mathbf{h}_2(t, \boldsymbol{\rho}) = \begin{bmatrix} |e_{fx}| \\ |e_{fy}| \\ |e_{fz}| \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{fxmax} \\ e_{fymax} \\ e_{fzmax} \end{bmatrix} \leq \mathbf{0} \quad (4)$$

$$\mathbf{H}_i(\boldsymbol{\rho}) = \left[\mathbf{h}_i(1, \boldsymbol{\rho}) \ \mathbf{h}_i(2, \boldsymbol{\rho}) \ \dots \ \mathbf{h}_i(N, \boldsymbol{\rho}) \right] \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

$$\mathbf{H}(\boldsymbol{\rho}) = \left[\mathbf{H}_1^T(\boldsymbol{\rho}) \ \mathbf{H}_2^T(\boldsymbol{\rho}) \right] \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\rho}_{k+1} = \boldsymbol{\rho}_k + \boldsymbol{\gamma}^T \Delta \boldsymbol{\rho}_k \quad (7)$$

また、本研究における IFT のパラメータのチューニングに用いる実験は、図. 3(a) に示した目標値を入力とした通常の実験と、図. 5 に示す目標値を 0 とし、通常の実験から得られた位置と力の目標値との誤差を入

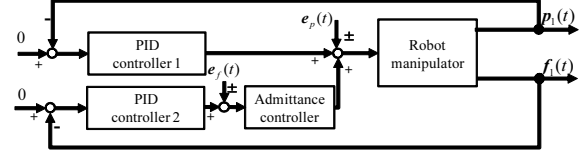


Fig. 5 Gradient experiment

Table 2 Parameters used for IFT control

$\boldsymbol{\rho}$	Parameters to be adjusted
$J(t, \boldsymbol{\rho})$	Index function
N	Sampling number
$\mathbf{e}_p \in R^{1 \times 2}(t, \boldsymbol{\rho})$ [mm]	Error of position
$\mathbf{e}_f \in R^{1 \times 3}(t, \boldsymbol{\rho})$ [N]	Error of force
$\mathbf{w}_p \in R^{2 \times 2}$	Weight of position
$\mathbf{w}_f \in R^{3 \times 3}$	Weight of force
$\mathbf{h}_1(t, \boldsymbol{\rho})$ [mm]	Constraint condition for position
$\mathbf{h}_2(t, \boldsymbol{\rho})$ [N]	Constraint condition for force
$\mathbf{e}_{pmax} \in R^{1 \times 2}$ [mm]	Acceptable error of position
$\mathbf{e}_{fmax} \in R^{1 \times 3}$ [N]	Acceptable error of force
$\boldsymbol{\gamma}$	Adjust parameter
Δt	Discrete time subtraction

力とした実験である。

4. カフ運動の再現・生成実験

4.1 実験条件 本研究で提案する制御システムを用いて、ダミー皮膚を対象としたカフ運動の再現、生成実験を行った。再現する変量は、図. 1 左の人間側の運動の計測のために、ロボットを装着した状態でヒトが屈曲・伸展運動を行った際の大腿部に装着されたカフの運動のものである。また、本実験では Σ_h における y 方向、 z 方向の二軸方向に対するカフ運動の、 Σ_d における同二軸方向の再現を行った。したがって、以下では x 軸方向について省略する。本カフ運動再現実験における、各パラメータは以下のように設定した。

$$\boldsymbol{\rho}_0 = \begin{bmatrix} {}^p K_{py} \ {}^p K_{dy} \ {}^p K_{iy} \ {}^f K_{py} \ {}^f K_{dy} \ {}^f K_{iy} \ {}^f K_{pz} \ {}^f K_{dz} \ {}^f K_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 6 & 6 & 5 & 5 & 1 & 1 & 6 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{e}_{pmax} = \begin{bmatrix} 0 & 10 \end{bmatrix}^T \quad \mathbf{e}_{fmax} = \begin{bmatrix} 0 & 10 & 20 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$\mathbf{w}_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1/16^2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{w}_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/16^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/46^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\gamma} = \text{diag}(0.2 \ 0.8 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0.5 \ 1 \ 1) \quad (11)$$

$$\boldsymbol{M} = \text{diag}(0.4 \ 0.2) \quad (12)$$

$$\boldsymbol{C} = \text{diag}(0.005 \ 0.01) \quad (13)$$

$$\boldsymbol{K} = \text{diag}(1 \ 75) \quad (14)$$

式(12)~(14)で示したアドミッタンス制御のゲインは、ダミー皮膚から計測された粘弾性特性⁽⁹⁾とその特性値を基にした運動方程式から決定されたものである。式(10)で示した重みは、評価関数に対して位置・力の平滑化のために、それらの入力 の最大値を用いて設定した。そして、式(8), (9), (11)の各パラメータは、本実験において適当に設定した。

4.2 試験結果 ダミー皮膚上で生成、再現したカフの運動の y 方向変位の結果を図. 6, y 方向の相互作用力の結果を図. 7, z 方向の相互作用力の結果を図. 8 にそれぞれ示した。各図において、縦軸を相対変位あるいは相互作用力、横軸を計測されたフレーム番号としている。Trial 1 は初期 PID ゲイン $\boldsymbol{\rho}_0$ におけるカフの運動の結果を示し、Trial 2 以降は計測された結果に基づいて IFT を適用し、更新された PID ゲインの下でカフ運動の再現実験を行った結果を示している。そして、各試行における評価関数とその時の PID ゲインを表. 3 に示した。

得られた評価関数に注目すると、本実験において 1~4 回の試行において評価関数の減少がみられ、その後増加が観測された。本実験では、試行を 5 回で終了している。そのため、IFT を用いることによって、評価関数を最小化するカフ運動の探索が行えることが確認できた。また、入力に近い値の範囲でカフ運動の探索が行えており、接触対象のヒトの粘弾性特性の近似特性に対するロバスト性も確認された。

生じたカフ運動に注目すると、図. 6, 図. 7 より、ダミー上では人体上に比べ、小さな変位が生じ、その変位量は試行ごとの差があまり生じていない。これに対して、発生する相互作用力には試行ごとに差が生じている。Trial 3,4 でみられるような、小さい変位で大きな相互作用力が生じている結果は、ダミー皮膚における摩擦係数、粘弾性係数が人体皮膚のものより大きいためであると推測される。また、Trial 1 に見られるような小さな相互作用力は、カフの接触状態によるものだと考えられる。図. 8 より、z 方向への相互作用力に大きな差はないため、接触面で生じる摩擦の合力の大きな差は試行間で生じないと考えられる。そのため、カフの接触面積が小さいために、接触面の多くの部分で

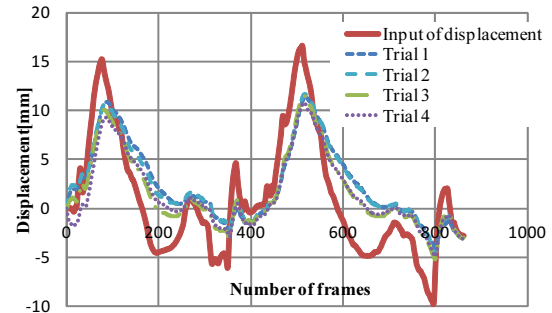


Fig. 6 Displacement of cuff on the dummy skin in y direction

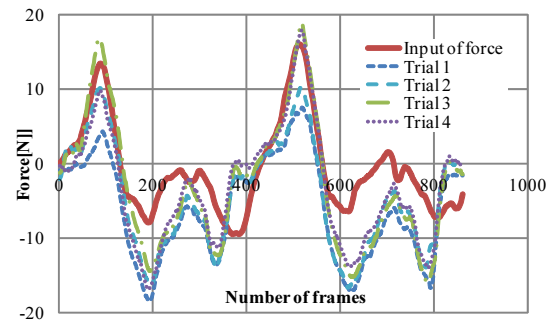


Fig. 7 Force of cuff on the dummy skin in y direction

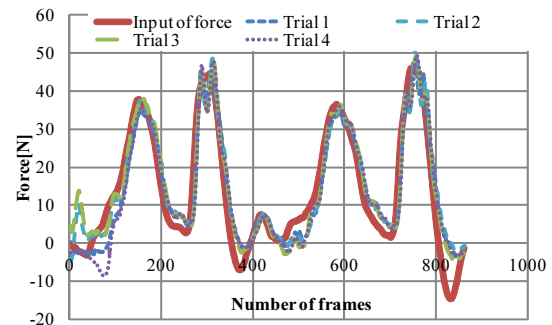


Fig. 8 Force of cuff on the dummy skin in z direction

Table 3 Result of the index function

	J	$\boldsymbol{\rho}$
Trial 1	1.92	[0.50 0.50 6.0 6.0 5.0 5.0 1.0 1.0 6.0]
Trial 2	1.78	[0.36 0.45 5.98 5.29 4.98 4.98 0.99 1.03 5.99]
Trial 3	1.78	[0.33 0.38 5.98 5.28 4.98 4.98 0.90 1.13 5.99]
Trial 4	1.59	[0.30 0.30 5.98 3.62 4.95 4.95 0.90 1.19 5.99]
Trial 5	1.85	[0.08 0.14 5.95 3.53 4.95 4.95 0.82 1.25 5.99]

滑りが生じ、ダミー皮膚の粘弾性の影響が小さくなったと推測される。

4.3 考察 本実験では、4 回目の試行において評価関数が最小であると認められるカフ運動を計測した。しかしながら、本結果は局所的に最小化が達成されている可能性を否定することができない。最適化の

局所性について、IFT は初期条件近傍においての最適なカフ運動の探索を行うため、大域的な最適化に至るための条件を初期条件の設定段階で決めておかなければならない。この、各初期条件の設定方法については今後さらに改良が必要である。

本結果では図. 6～図. 8 の横軸をフレーム番号で定量化した。これは、カフ運動の相対的な変量のうち速度の再現が達成されていない、つまり、ダミー皮膚における粘性要因の挙動が必ずしも十分に実現されているとは言えない事を示している。これは最適化に要する処理時間に依存するものである。この点に関しては、最適化のプロセスをオフラインで実施し、その結果を本手法によって生成されたカフの運動として直接入力し、速度要因の挙動の影響を反映させた結果と最適化のプロセスの中で得られた結果の比較を行う形により忠実な実験を行うことができると考えている。

最後に、創傷に対する安全性に関する妥当性確認を達成するための今後の課題として、本研究の手法にもとづき生成されたカフ運動を豚の皮膚に対して繰り返し与えることが必要である。その際、NAYLOR の報告した水疱の発生条件⁽⁷⁾が安全検証データとして活用できると考えている。

5. 結 言

本稿では、人間装着型ロボットの接触安全性評価のうち、本研究グループが開発した妥当性検証試験方法として、ダミー皮膚に対するカフ運動の生成、再現に関する運動の制御システムと、カフ運動の最適化手法について示した。そして、その試験方法を用いてダミーに対するカフ運動の再現実験を行った。得られた結果より、まず、設定した初期値近傍で最小となる評価関数を探索でき、カフ運動の最適化が確認された。そして同時に、探索されたカフ運動は入力に近い範囲の結果となっており、接触対象のヒトの粘弾性特性の近似特性に対するロバスト性も確認された。また、今後の課題として、評価関数の大域的な最小値を探索するために、初期条件の設定方法を確立しなければならない。

6. 謝 辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から受託した「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。本研究の課題提案に向けてご討議ならびにご示唆を頂いたサイバーデザイン社鍋島厚太氏に感謝する。また、本研究の開始にあたり、技術的な助言を頂いた伊藤薫氏(名古屋大学)、梅津真弓様、柳様紳一郎(安川電機)、朴雲

埴氏 (LG Electronics Inc.) に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 山田 陽滋, 山海 嘉之, 河本 浩明, 李 秀雄, 鍋島 厚太, “パワーアシスト機器の安全”, 日本機械学会誌, 114 巻, 1106 号, pp.45-48, 2011 年 1 月.
- (2) 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-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.
- (3) 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.
- (4) ISO 13482, “Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots”, 2014.
- (5) 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, pp. 4905-4910, 2011
- (6) 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.4567465.
- (7) P.F.D NAYLOR, M.A, M.D., “EXPERIMENTAL FRICTION BLISTERS”, THE BRITISH JOURNAL OF DERMATOLOGY, vol 67, October. 1955, pp. 327-342.
- (8) 石黒 健次, 山田 陽滋, 秋山 靖博, 原 進, 岡本 正吾, “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-”, 日本ロボット学会, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門, 計測自動制御学会 SI 部門主催 第 19 回ロボティクスシンポジウム, 神戸, pp. 313-318, 2014.3.
- (9) Masaya Aso, Yoji Yamada, Kengo Yoshida, Yasuhiro Akiyama and Yasumi Ito, “Development of complex dummy tissues by evaluating the mechanical characteristics of human thighs”, Robotics and Biomimetics (RO-BIO), 12-14 Dec. 2013, pp.1450-1455.
- (10) Hakan Hjalmarsson, “Iterative Feedback Tuning - an overview”, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADAPTIVE CONTROL AND SIGNAL PROCESSING, volume 16, May. 2002, pp. 373-395.
- (11) Un Sik Park, Yoji Yamada, and Yoshihiro Nakabo, “Force Control with safety Constraints via Iterative Feedback Tuning”, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, May 12-17, 2009, pp.3670-3675