(18)

官能評価と生理学評価に基づくヘッドケアロボットの開発

安藤健^{1,2}, 武田真季², 山田憲嗣², 大野ゆう子², 本田幸夫^{2,3}

¹パナソニック株式会社, ²大阪大学, ³大阪工業大学

要旨 近年、心身の疲労を和らげるマッサージに注目が集まる中、特にヘッドケアの需要が高まっている。これまでに人の指を模した接触子で頭皮・頭髮に対してマッサージ様のこすり洗い（接触摺動洗浄）をするヘッドケアロボットを開発している。本稿ではまず官能評価（階層的クラスタリング）と生理学評価（ATP による洗浄性評価と自律神経系計測による快適性評価）を組み合わせて洗浄領域拡大と快適性の更なる向上という試作機の課題を抽出した。さらに、再度官能評価と生理学評価を行い、5 節リンク機構やコンプライアンス制御などを用いることで基本機能である洗浄性、付加機能である快適性が十分な性能で実現できていることを示した。

キーワード：ロボット、洗髪、マッサージ、洗浄性、快適性

1. はじめに

成熟した社会では、多くの人が肉体的疲労に加え、精神的なストレスを抱えており、身体的・精神的な快適性を求めている。そこで、マッサージチェアなど人と物理的に接触し、快適性を提供する機械の開発・商品化が積極的に行われている¹⁾。

近年、マッサージの中でも頭部を対象としたヘッドケア（ヘッドスパ）・洗髪が、理美容店・介護施設・スパ施設などで実施されている。これは、ヘッドケアが、清潔だけではなく、爽快感・リラックスを得るために欠かすことのできない行為であるからである²⁾。しかし、施術者にとって、洗髪を含むヘッドケアは、手荒れ、腰痛の大きな原因になり、離職などの問題となっている。また、介護施設ではヘッドケア・洗髪は大きな業務負担となるため、その頻度が低くなっている、という報告もある³⁾。

このような問題を解決するために、強い水流を用

いて洗髪を行う自動洗髪装置が実用化され、理美容店を中心に導入が進んでいる⁵⁾。ただし、くすぐたさなどが指摘されているほか、大量の水を使用するなどの課題もある。これらに対して、著者らは、これまでに蓄積したロボットハンドの技術を応用し、人の指を模した接触子で頭皮・頭髮に対してマッサージ様のこすり洗い（接触摺動洗浄）をするヘッドケアロボットを開発している。このロボットにより、施術者の労力を低減し、被施術者には清潔さと快適さを提供することを目指している。

ヘッドケアロボットの開発におけるロボット工学の面での課題は、快適な接触技術の開発である。従来のロボットの多くが産業用ロボットであり、人と隔離した状態での使用を想定した技術として開発されてきている。近年では、医療福祉支援などを目的として人と直接接触するロボットの開発が進められているが、基本的には安全に接触する技術という研究がほとんどである^{7,8)}。これらに対して、本稿で開発されるロボットでは、安全は最優先ではあるが、

図1 開発プロセス

それに加え、接触者に快適さも提供できる接触技術を開発する必要がある。

ただし、ヘッドケアロボットの基本機能はあくまでも洗髪であり、洗浄性と快適性を併せ持つロボットを開発することを目的とする。

本開発においては、図1に示すようにロボットのコンセプト設計の後に、プロト0号機⁵⁾を開発し、その洗浄性・快適性を官能評価・生理学評価により評価することで課題抽出を行う。その結果を開発にフィードバックすることでプロト1号機の開発を行い、十分に要求性能が満たされていることを再度官能評価・生理学評価により評価する、というプロセスを採用した(図1)。このように官能評価や生理学評価に基づいた開発は、人間工学として盛んに行われている。ただし、多くの研究開発は筆記具¹⁹⁾や椅子²⁰⁾など静的に人間と接触するモノを対象としており、本研究のように動的に人間に接触するロボットに対して行われることは少ない。よって、官能評価や生理学評価に基づいたロボット開発には高い新規性がある。

図2 ヘッドケアロボットによる施術の様子

図3 4節リンクを用いた押圧アーム

2. プロト0号機の概要

2.1 コンセプト

ヘッドケアロボットは「人に優しく触れ、泡でキレイに」をコンセプトに開発したロボットである(図2, 810×1045×723[mm])。人による施術を模倣するのではなく、人が提供している洗浄性・快適性を実現することを目的とした。

ロボットでは、下洗い、洗浄、コンディショニング、乾燥といった一連のプロセスを全て実現する。特に、洗浄工程において、ムース状に泡立てたシャンプーを利用し、指を模した接触子で接触摺動洗浄することにより、手で洗い、揉みほぐされているかのような感覚が得られるのが特長である。また、水流だけでなく、接触子で洗浄を行うことで、使用する水の量を従来の自動洗髪機の約1/3の15[L]程度にすることができる。

2.2 ヘッドケアロボットの構成

ヘッドケアロボットは左右2本のスイングアーム

図4 頭部形状にならうエンドエフェクタ

ユニットと後頭部洗浄ユニットから構成される。また、スイングアームユニットは、押圧アームとその先端のエンドエフェクタから構成される。

2.3 押圧アーム

押圧アームの外観を図3に示す。なお、押圧アームは実際にはカバーを有しているが、図3では説明のためカバーを外した状態を図示している。押圧アームはエンドエフェクタを支持し、頭皮に対して接近・離脱させるための部分である。パラレルリンク機構による支持系となっており、エンドエフェクタと押圧アームの接続部分に配置された力センサによりエンドエフェクタで生じる押圧力を計測することで、後述のコンプライアンス制御を行っている。

押圧アームには、4つのリンクを2つずつ並行に結合したパラレルリンク機構を2セット用いている。図3の中の実印で示した軸（可動角： $22.4[\text{deg}]$ ）を駆動することで、エンドエフェクタを頭皮に対して接近・離脱させることができる。また、パラレルリンク機構は単一リンクの場合と比較して、エンドエフェクタ支持系の剛性強化の効果も期待される。

2.4 エンドエフェクタ

エンドエフェクタは頭髮に接触・摺動する部分であり、人の指を模した弾性体による8個の接触子を配置している（図4）。エンドエフェクタは、7軸の受動関節により頭の形状になじむ自動調芯機構と4軸の駆動関節を単一の電動モータで駆動する円筒ラ

図5 制御ブロック図

ック機構を用いた駆動系が組み込まれている⁵⁾。

2.5 制御系

押圧アームには、力センサを用いたコンプライアンス制御を用いている。コンプライアンス制御は、ゴムのような弾性体を擬似的に作り出すことでロボットが頭部に優しく接触することができる制御である。押圧アーム制御のブロック図を図5に示す。石井らの仮想コンプライアンス制御⁹⁾と類似の系を採用しており、押圧アームにはPID位置制御系によりレギュレータを構成している。エンドエフェクタと押圧アームの接続部分に設置された力センサによって押圧力を検出し、位置制御系の押圧角度指令値を操作することで押圧力のサーボ系を構成している。サーボ系の安定化補償器は、一次遅れ要素により構成している。位置制御系を用いることで、エンドエフェクタを頭部へ接触させて揉み擦り動作するモードと、エンドエフェクタを頭部から離脱させて角度位置保持するモードの、2つのモード間の移行が容易にできる。

まず、洗髪動作前に適当なスイングアームのスイング角度において、エンドエフェクタが頭部へ接触したときの押圧アームの押圧角度を実際に測定し、スイング角度と押圧角度の組み合わせをテーブルに保存する。そのテーブルをもとに、洗髪動作時の押圧力制御において、スイング角度に応じて補間して算出した押圧角度目標値をフィードフォワードさせ

ている（図5のフィードフォワード補償器）。

また、エンドエフェクタと押圧アームの接続部分に組み込まれた力センサによる押圧力の検出では、エンドエフェクタの自重成分が力センサの押圧力に重畳される。スイング角度に応じて補完して算出したエンドエフェクタの自重成分を力センサの出力値から差し引くことで、押圧力を検出している（図5の自重補償器）。

さらに、各スイングアームユニットの押圧系の作用子の実効質量に対して頭部の質量は十分に大きくないので、頭部の質量を介しての左右スイングアームユニットの押圧系の干渉作用の影響が無視できない。そこで、押圧角度指令値の操作量とその速度成分を加算して、反対側の押圧角度指令値の操作量に重畳することで押圧系の相互影響を簡易的に抑制している（図5の非干渉化補償器）。

3. プロト0号機の課題抽出実験

3.1 目的

開発したプロト0号機の課題を抽出することを目的として、洗浄性と快適性の生理学的評価および被験者による官能評価を実施する。生理学的評価においては、少なくとも人と同程度の性能を要求性能とし、ロボットによる施術（ロボット施術）と看護師による施術（人施術）を比較することで性能評価を行うこととした。

3.2 方法

1) 実験条件

対象は口頭、書面にて本研究の主旨を説明し、理解・同意が得られた健常者18名とした。対象者の平均年齢は 25.0 ± 5.43 歳であった。髪型は、頭髪の長さが400[mm]以下のセミロングヘアまでを対象とし、平均 246 ± 108 [mm]であった。被験者には、a) 実験前日は過度なアルコール・カフェインの摂取、夜更かし、過度な運動を行わないこと、b) 実験日前夜・実験日当日の洗髪は行わないこと、c) 当日は整髪料・マニキュアをつけてこないこと、d) 実験時食後3時間以上経過していること、を指示し

た。また性周期による自律神経系への影響が指摘されているため、女性の対象者は実験日当日が低温期であることを確認した¹⁰⁾。なお、本研究については大阪大学保健学科倫理委員会の承認を得て行った。

室温 24 ± 2 度、湿度 50 ± 10 %の安定した環境で実験を行なった。

被験者は、人施術群・ロボット施術群でそれぞれヘッドケアを行った。全て洗髪所要時間は約5分（すすぎ1分、洗い2分、すすぎ1分30秒）とし、同量のシャンプー（パンテーンPRO-Vエクストラダメージケアシャンプー、P&G）を用いた。どちらの場合も、洗髪椅子を倒してファウラー位でヘッドケアを行なった。ただし、人施術群は臨床経験のある看護師による洗髪とした。

2) 官能評価

人施術およびロボット施術の後にヒヤリングを行い、フリーコメント形式でまずロボットに対する印象、良かった点、悪かった点などを記入し、その後、人による施術と比較したときの印象、良かった点、悪かった点などに関する感想を取得した。得られた記入結果に対して、出現パターンが似通った語の組み合わせを解析することができる階層的クラスター分析を用いることでロボットに対する印象をまとめた。クラスターはWard法により5つに分類した。

分析結果は、デントログラム（樹形図）として得られ、単語同士がより近いところで繋がっているほど出現パターンが近いこと示す。

3) 洗浄性評価

人施術群・ロボット施術群でそれぞれヘッドケアを行い、前後で汚れの量を計測した。

本実験では、汚れを細菌・皮脂の量とし、有機物があるところに存在するATP（アデノシン3リン酸）を検出することで、洗浄性を評価した。この手法は、手洗いによる洗浄性の評価¹¹⁾などに用いられている。ATP量はルミテスター（キッコーマン）を用いて計測し、頭頂部、左右側頭部、後頭部、襟足の計5箇所 の頭皮において計測した。事前の実験により頭髪の汚れのほぼ水流により落ちていることがわかったので、毛根の皮脂洗浄が十分に行われているかを検証するために、頭皮のATP量を計測した。

測定では、ペン型デバイスを測定部位の50[mm]範囲に対して、同一の力で10往復擦過した。測定手技による誤差を最小限にするため、擦過・測定は同一実施者が行なった。ATP測定は、ヘッドケア前とヘッドケア後ドライヤーで整髪した後の2回行い、それぞれの測定値を、「ヘッドケア前ATP値 ATP_{before} 」「ヘッドケア後ATP値 ATP_{after} 」とした。

また、洗浄性能 $Clean$ を

$$Clean = (ATP_{before} - ATP_{after}) / ATP_{before} \quad (1)$$

と定義し、洗浄度 R を

$$R = Clean^{Proto0} / Clean^{Human} \times 100 \quad (2)$$

とした。洗浄度 R は、100を超えると人施術より洗浄性能が高く、100以下の場合は人より洗浄能力が低いことを示すものである。

4) 快適性評価

人施術とロボット施術による快適性の評価を自律神経系の生理信号を計測することで行った。信号計測は施術前後に10分間仰臥位・閉眼状態で安静にした後に行った。ただし、人施術においては、接触による快適性を評価するために看護師に対して被験者と必要以上に会話をすることを避けるように指示した。

計測指標は、心拍変動 (HRV: Heart rate variability)¹²⁾、収縮期血圧 (SBP)・拡張期血圧 (DBP)¹³⁾、心拍数 (HR)¹⁴⁾、唾液アミラーゼ活性 (sAA)¹⁵⁾、末梢皮膚温度 (PST)¹⁶⁾とした。心拍変動は右人差指に装着した加速度脈派計 (SA-3000P, 東京医研製)、血圧は右手首に装着したデジタル血圧計 (EW-BW30, パナソニック製)、末梢皮膚温度は左手中指と親指で挟んだ温度センサ (DS101, 立山科学製)、唾液アミラーゼは酵素解析装置 (CM-2.1, ニプロ製) により計測した。

心拍のピーク・ピーク間の時間変動を解析する心拍変動解析 (HRV) は、周波数領域での解析をすることで自律神経活動を計測することができる。具体的には以下の3項目を算出した: a) ピーク・ピーク間のRR間隔の標準偏差を表すSDNN (副交感神経系指標)、b) 高周波成分 (HF: 0.15 ~ 0.4

表1 快適性評価指標

計測機器	指標	交感・副交感	人施術	ロボ施術
加速度脈波計	SDNN	副交感	--	--
	HF/TP	副交感	--	--
	LF/HF	交感	--	--
血圧計	SBP	交感	2mmHg低下	--
	DBP	交感	--	--
	心拍数	交感	2bpm低下	3bpm低下
唾液酵素分析装置	アミラーゼ活性	交感	--	--
温度計	指先温度	副交感	2.9度上昇	2.3度上昇

注) SBP=収縮期血圧, DBP=拡張期血圧

[Hz]) のパワーと全スペクトル (TP) のパワーの比 HF/TP (副交感神経系指標)、c) 低周波成分 (LF: 0.04 ~ 0.15[Hz]) のパワーと高周波成分 HF のパワーの比 LF/HF (交感神経系指標)¹⁷⁾。

SDNN, HF/TP, 末梢皮膚温度は副交感神経系の評価指標であり、LF/HF, 血圧, 心拍数, 唾液アミラーゼ活性は交感神経系の評価指標である。よって、健全なストレス状態ではSDNN, HF/TP, 末梢皮膚温度の値が上昇し、被験者はeustress状態、リラックス状態になる。一方、LF/HF, 血圧, 心拍数, 唾液アミラーゼ活性は値が低下すると快適性が高まっていることになる。

3.3 結果

1) 官能評価

図6にプロト0号機に対する階層的クラスター分析の結果を示す。5つに分かれたクラスターはそれぞれ四角枠で囲ったように図6の上から騒音に関するもの、洗浄に関するもの、水に関するもの、マッサージに関するもの、ロボットハンドに関するものであった。また、図6において一番強い繋がりは(音が)「気になる」という騒音の問題、二番目に強いものが「洗われていない」という洗浄感の問題があることがわかった。

図6 プロト0号機の階層的クラスター分析

2) 洗浄性

頭皮全体の洗浄性の平均を計算すると、人施術に対して77%となった。また、特に、官能評価で「洗われている感じがしない」という指摘のあった頭頂部に対する洗浄性を検証すると、人施術に対してロボット施術は61%の洗浄能力しかないことがわかった。

3) 快適性

人施術とロボット施術とも、ヘッドケアの前後で、心拍変動解析における交感神経系指標SDNN、HF/TP、副交感神経系指標LF/HFには有意な変化はなかった。血圧は、人による洗髪時の収縮期血圧のみ2[mmHg]低下が認められたが、他は変化がなかった。図7に示すように、心拍数は、人の場合は2[bpm]、ロボットの場合は3[bpm]有意に低下した。唾液アミラーゼは、ストレス低下の傾向はみられるものの、有意な変化はなかった。一方、抹消皮膚温は、図8に示すように、人で2.9℃、ロボットで2.3℃有意に上昇した。

3.4 考察

1) 官能評価

図6からわかったクラスターを更に分析すると、「騒音」は水と機械音に関すること、「洗浄性」は全

図7 心拍数の変化

図8 末梢皮膚温度の変化

図9 プロト0号機における洗浄の様子

体的に洗われている感じがしないことと頭頂部・後頭部にアームが届いていないように感じることで、「水」はくすぐったさと温度、という課題があることが浮かび上がった。頭頂部・後頭部の洗浄性が低下していることはATPによる実験でも明らかになっており、被施術者の感覚でもそのことがわかるほど明確な課題であることが確認された。一方、「マッサージ」は気持ちよい、「ロボットハンド」は押す力が良い、というプラスの意見もあり、快適性を提供できる可能性が示唆された。

2) 洗浄性

洗浄実験の結果より、頭頂部の洗浄性能は人による施術と比較すると低下していることがわかった。この原因を考察すると、図9に示すようにロボット

のアームおよびエンドエフェクタが頭部のセンターラインに到達していない事例が確認できた。つまり、左右スイングアームの境界領域となる箇所においては洗浄できていないことが示唆された。これは開発したプロト0号機は女性の平均的な頭部形状を中心に形状のばらつきを考慮して設計されているものの、頭部形状が想定した円弧状になっていない被験者の場合や頭部位置とアームの相対的位置関係が理想状態と異なる場合には、アームが頭部センターラインまで届かないためである。

3) 快適性

心拍数の低下、抹消皮膚温の上昇は、どちらも被験者がリラックス状態であることを示す指標であり、副交感神経系が優位になっていることがわかる。また、3度近い手先温度上昇は、20分間の足湯と同じ効果であり、高いリラックスかつ血液循環促進の効果である¹⁸⁾。

以上の傾向は、人施術・プロト0号機施術で同様であり、プロト0号機は人と同程度のリラクゼーション効果があることが示唆された。

4) 課題のまとめ

洗浄性に関しては、基本機能であるにも関わらず頭頂部など頭部のセンターラインに対してエンドエフェクタが到達しておらず、洗浄能力が人の施術と比較して30～40%低下していることがわかった。

快適性に関しては、プロト0号機による施術は人施術と同程度の快適性を提供できていることがわかった。必要最低限の性能は満たされているが、官能試験によると「洗われている感じがしない」という意見が挙げられている。これは動作がスイング動作のみで単調であるため、人にヘッドケア施術を行っているのと大きく異なるためである。

よって、プロト0号機の課題は

- (1) 頭頂部を中心とした洗浄性の向上
- (2) 複数動作の実現による更なる快適性（洗われている感覚による爽快感・快適さ）の向上

である。

図10 五節リンクを用いた押圧と伸縮

4. プロト1号機の開発

4.1 開発コンセプト

3章でわかった2つの課題を解決するためにロボットアームの自由度を1つ追加する。これにより洗浄領域を拡大でき、新たな自由度の追加により複雑な動作を実現することができ、より洗われている感覚、更には快適さを提供できる。

4.2 開発課題

プロト0号機のスイングアームユニットでは、4節パラレルリンク機構を用いることで、押圧の高い機構剛性を得、安定した押圧動作を実現した。ただし、左右アームの境界となる頭部中央領域にエンドエフェクタが到達できないことがあった。

エンドエフェクタが頭部全体をカバーする可動域を有し、頭部形状に応じて頭部に接触するためには、スイングアームユニットが伸縮と押圧の自由度を有する必要がある。

押圧と伸縮を実現する機構として従来の自動洗髪機で提案された方式⁶⁾は、接触子の伸縮方向移動をラック機構で行っている。このため、ラックとピニオンの間での頭髮が巻き込み問題が生じる可能性がある。また、押圧は接触子であるゴムの弾性回復に依存し、アクティブな制御ができず、大きな押圧荷重の伝達は困難である。

よって、本開発における技術課題を、既存のパラレルリンクの利点を活かしつつ、左右アームの境界エリアの洗浄を実現するための「1個のリンクアーム

図 11 押圧と伸縮を実現する機構

図 12 押圧アームの制御ブロック線図

ム系で頭部形状に適合可能な押圧駆動と伸縮駆動を実現する高剛性なスイングアームユニットの機構開発」とする。さらに、1リンクアームで2自由度を実現することで各自由度の干渉が発生するので、それらを考慮した安全かつ快適に頭部に接触する制御技術の開発も課題とする。

4.3 機構系

頭部への接近離脱を行う押圧アームは、従来の4節に伸縮の1節を加えた5節閉リンク機構による支持系とし、リンク構造の2カ所を駆動することで、押圧(図10a)と伸縮(図10b)を行うものとした。

2自由度の駆動子をいかにコンパクトに構成するかが実用上の設計課題であり、プロト1号機で開発した機構図を図11に示す。押圧は、安全上バックドライバビリティを有することが望ましい。よって、出力軸と平行にモータを配置し、平歯車によりトルクを伝達した。一方、伸縮は、ウォームギアを用い、従来デッドスペースであったスイングアームの根元の中空軸受内に、出力軸と直交方向にモータを配置

し、ギアボックス内スペースの効率的利用を実現した。

この機構は、1リンクで2自由度を簡単に実現し、回転系のみであるので、防水・髪の毛の巻き込み防止が容易である。また、従来モデルの平行リンク機構による押圧に加え、伸縮の自由度を実現し、伸長方向に約20[mm]、収縮方向に約15[mm]洗髪領域が拡大した。AISTのデータベース等を参考とすると、これによりメインユーザになる女性の頭部はほぼ全領域をカバーすることができる。

4.4 制御系

アームの制御のブロック図を図12に示した。基本的な制御は2章に示したプロト0号機と同様であり、エンドエフェクタを頭部に押し付ける押圧系の制御は、位置ベースのコンプライアンス制御を行った。また、新たに追加した伸縮駆動は位置制御を実装した。ただし、伸縮動作により頭部押圧方向成分を含むエンドエフェクタの位置変化が生じる。すなわち、アームを伸ばすとエンドエフェクタが頭部から離れ、逆にアームを縮めるとエンドエフェクタが頭部に接近してしまう。そこで、伸縮長変化に対する押圧角度影響成分を幾何学的に算出し、図12に示すように伸縮角度情報を押圧制御系の位置制御操作量に重畳することで非干渉化を図っている。伸縮動作による影響を補償しない場合は、押圧制御に約20%の誤差変動があったが、非干渉化することで約10%まで低減することができた。

5. プロト1号機の評価

5.1 目的

プロト0号機の洗浄性と快適性の課題を解決するために開発した5節閉リンク機構および伸縮と押圧の干渉を考慮した制御系を組み込んだプロト1号機の評価を行うことを目的とする。3章にて課題を抽出したときと同様の実験(官能評価、ATPによる洗浄性評価、自律神経系信号による快適性評価)を行い、更に人施術およびプロト0号機施術による洗浄性・快適性と比較を行うことで、要求性能が満た

されていることを実験的に検証する。

5.2 方法

1) 条件

対象は口頭、書面にて本研究の主旨を説明し、理解・同意が得られた健常者 18 名とした。対象者はプロト 0 号機の実験には参加していない者とし、年齢：25.2±5.7 歳，身長：1.65±0.09[m]，体重：56.7±8.1[kg]であった。髪型は、頭髪の長さが 400[mm]以下のセミロングヘアまでを対象とし、263±137[mm]であった。実験参加条件などは 3.2 節と同様とした。なお、本研究については大阪大学保健学科倫理委員会の承認を得て行った。また、室温 20.4±2.5 度，湿度 50±20 % の安定した環境で実験を行なった。

2) 官能評価

押圧動作と伸縮動作を実現するプロト 1 号機を用いたときの被験者の感想を施術後にヒヤリングを行った。ヒヤリング方法は 3.2 節と同様とし、得られたフリーコメントに対して、階層的クラスター分析を行うことでロボットに対する印象を解析した。

3) 洗浄性評価

プロト 1 号機を用いて洗浄性を評価した。実験方法は 3.2 節と同様とし、3.2 節と同じ頭部 5 箇所 ATP 量を計測することで洗浄度 R を評価した。

$$R = \text{Clean}^{\text{Proto1}} / \text{Clean}^{\text{Human}} \times 100 \quad (3)$$

施術の前後で各指標に有意な変化があったかをマンホイットニーの U 検定により検証した。

4) 快適性評価

プロト 1 号機を用いて快適性を評価した。実験方法は 3.2 節と同様とし、自律神経系の生体信号を計測することで評価した。

施術の前後で各指標に有意な変化があったかをマンホイットニーの U 検定により検証した。

5.3 結果

1) 官能評価

図 13 にプロト 1 号機に対する階層的クラスター分析の結果を示す。6 つに分かれたクラスターはそ

図 13 プロト 1 号機の階層的クラスター分析

(1)全体平均:

(2)頭頂部

図 14 プロト 0 号機とプロト 1 号機の洗浄性比較

れぞれ四角枠で囲ったように図 13 の上から「力加減」に関するもの、「接触感」に関するもの、「時間」に関するもの、「部位」に関するもの、「洗われ感」に関するもの、「水しぶき」に関するもの、であった。また、図 13 において一番強い繋がりは「良い力」という力加減について、二番目に強いものが「人間に近い」という手触りについて、三番目に「洗う感じ」という洗浄感に関するもので、いずれも肯定的であることがわかった。ただし、首や後頭部では力が弱いことが指摘されていることも確認できた。

2) 洗浄性評価

図 14 に示したように頭皮 5 箇所を平均を計算すると、人施術に対して洗浄性は 102 %（プロト 0 号機施術時は 77 %）となった。また、プロト 0 号機施術時に問題であった頭頂部の洗浄性は人に対して 99 %（プロト 0 号機施術時は 61 %）となった。

3) 快適性評価

プロト 1 号機によるヘッドケアの前後で生理指標は表 2 に示すような変化が生じた。

これらの変化の中で、前後で有意差が確認できたものは、全てリラックス方向に変化しているものであった。

5.4 考察

1) 官能評価

プロト 0 号機を用いたときの官能評価で指摘されていた「騒音」「洗われている感じがしない」という課題はプロト 1 号機での官能評価では指摘されなかった。逆に、洗われ感に関しては、プロト 1 号機では「押す力が良い」「人間の手に近い」「洗っている感じがする」など目的とした人手のマッサージのような洗浄を提供できていることが示唆された。

ただし、首から後頭部にかけて力が弱いことや水しぶきの問題が指摘されており、課題も残されていることがわかった。

2) 洗浄性評価

図 15 からわかるようにアームの伸縮機構を追加することで頭皮全体、特に頭頂部の洗浄性が大幅に改善した。これは図 15 に示したようにプロト 1 号機ではアームの伸長により頭部のセンターラインを超えて洗髪を実施しており、頭頂部などを洗い残すことなく洗浄できたためである。また、官能評価で力が弱いと指摘された後頭部・襟足部に関しても洗浄度は 80 % 以上となっており、洗えていることが確認できた。以上より、看護師による施術とほとんど等価な洗浄能力を有することができた。

ただし、今回の実験では髪の長さだけを条件にしたが、頭髮・頭皮の状態に洗浄性は影響を受けるものと考えられ、そのような条件とロボットによる洗浄性の関係を示すことは今後の課題である。

表 2 快適性の比較

指標	人	プロト 0 号機	プロト 1 号機
SDNN ms	6.9±22.0	-0.4±20.4	3.9±27.2
HF/TP	-0.03±0.25	-0.024±0.18	0.09±0.22 ※
LF/HF	0.28±1.14	0.07±1.12	-0.84±1.4 ※※
収縮期血圧 mmHg	-2.3±4.5※※	-1.8±5.6	1.4±4.8
拡張期血圧 mmHg	2.2±4.8	-0.4±2.6	1.3±4.7
心拍数 bpm	-1.5±2.6 ※※	-3.1±2.7 ※※※	-2.2±3.5 ※※※
唾液アミラーゼ [*] kIU/L	-6.3±20	-2.4±19	-10±20 ※
末梢温度 K	2.9±5.2 ※※	2.3±4.5 ※※	1.2±2.2 ※※

※：p<0.1, ※※：p<0.05, ※※※：p<0.01

図 15 プロト 1 号機における押圧アーム動作

3) 快適性評価

表 2 に示したようにプロト 1 号機によるヘッドケア施術により前後で有意に指標が変化したものは HF/TP, LF/HF, 心拍数, 唾液アミラーゼ活性, 末梢皮膚温度の 5 つの項目であった（人施術は 3 項目, プロト 0 号機施術は 2 項目）。この中で交感神経系指標である LF/HF, 心拍数, 唾液アミラーゼ活性の値は低下し、副交感神経系指標である HF/TP と末梢皮膚温度の値が上昇しているのを、被施術者はリラックス状態にあることが確認できる。よって、プロト 1 号機は人施術やプロト 0 号機施術よりも高い快適性を提供することができる。

実験中の観察によると、被験者の約半数は実験中に寝ていたように感じられた。また、被験者の感想でも「眠くなった」「頭皮をマッサージされている間に寝てしまった」というものがあり、快適性を提

供できていることが確認できた。

6. おわりに

近年、心身の疲労を和らげるマッサージに注目が集まる中、特にヘッドケアの需要が高まっている。我々はこれまでに人の指を模した接触子で頭皮・頭髮に対してマッサージ様のこすり洗い（接触摺動洗浄）をするヘッドケアロボットを開発している。本稿ではまず官能評価（階層的クラスタリング）と生理学評価（ATP による洗浄性評価と自律神経系計測による快適性評価）を組み合わせることで洗浄領域拡大と快適性の更なる向上というプロト0号機の課題を抽出した。さらに、再度同様の評価を行い、人による施術、プロト0号機による施術、改良したプロト1号機による施術を用いたときの洗浄性と快適性を比較することで、5節リンク機構やコンプライアンス制御などを用いることで基本機能である洗浄性、付加機能である快適性が十分な性能で実現できていることを示した。

謝辞

本開発において、被験者として協力いただいた皆様に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。ロボットの設計・制御を行っていただいたパナソニック株式会社廣瀬俊典氏、藤岡総一郎氏、水野修氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 田辺昌樹, 西岡克敏, 飯田健夫: マッサージ機の使用時間に対する快適性評価, *Dynamics & Design Conference* 2004, 345-1-4, (2004)
- 2) ヴァージニア・ヘンダーソン: 看護の基本となるもの (日本看護協会出版社) pp. 51-56 (1995)
- 3) 蛭名恵他: 臥床が必要とされる患者の洗髪回数と洗髪用具についての実態調査, *十和田市立中央病院研究誌*, 14 (1), pp. 60-62 (1993)
- 4) 自動洗髪機アクアフォルテ, <http://www.tb-net.jp/products/shampoo/aquaforte/>.
- 5) T. Hirose, S. Fujioka, O. Mizuno and T. Nakamura: Development of Hair-washing Robot Equipped with Scrubbing Fingers, *2012 IEEE ICRA*, pp. 1970-1975, (2012).
- 6) 武田修宏, 横井淑子, 伊藤和正: 自動頭部洗浄装置, 特開 2001-149133 (2001)
- 7) 菅野重樹, 菅岩泰亮, 岩田浩康, 市川健太郎, 金道敏樹: 人間共存ロボットの主体的判断による知能移動, 第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集, paper no. 3J3-7, (2010)
- 8) 小林洋, 渡辺峰生, 安藤健, 関雅俊, 藤江正克: 筋肉の粘弾性特性を再現する分数次微分方程式を用いたインピーダンス制御, *バイオメカニズム*, pp. 239-250, (2012)
- 9) 石井裕之, 古賀裕樹, 小保川佑一, JORGE Solis, 高西淳夫, 勝又明敏: オーラル・リハビリテーション・ロボット WAO-1 における仮想コンプライアンス制御の有用性の検討, *日本コンピュータ外科学会*, vol. 11, no. 2, pp. 65-73, (2009).
- 10) Yamamoto M., Tsutsumi Y., Furukawa K. Kanno Y., Maruyama R and Satoh H.: Influence of the normal menstrual cycle on autonomic nervous activity and QT dispersion, *J of Bioelectro-Magnetism*, 5(1), 152-153, (2003)
- 11) 久田友治, 太田光紀, 垣花シゲ, アデノシン三リン酸測定を用いた手術時手洗い評価の臨床的意義, *日本環境感染学会誌*, 26(2): 83-6, (2011)
- 12) Task force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, Heart rate variability: standard of measurement, physiological interpretation and clinical use, *Circulation*, 93, 1043-1065, (1996)
- 13) Ko YL and Lin PC, The effect of using a relaxation tape on pulse, respiration, blood pressure and anxiety levels of surgical patients, *J Clin Nurs*, 21(5-6), 689-697, (2012)
- 14) Yokoyama K, Ushida J., Sugiura Y., Mizuno M., Mizuno Y. and Takata K: Heart rate indication using musical data, *IEEE Trans on Biomedical Engineering*, 49(7), 729-733, (2002)
- 15) Takai N., Yamaguchi M., Aragaki T., Eto K., Uchihashi K. and Nishikawa Y.: Effect of psychological stress on the salivary cortisol and amylase levels in healthy young adults, *Arch Oral Biol.*, 49(12), 963-968, (2004)
- 16) Pruneti CA and Boem A, Physiological response in healthy subjects and in patients after myocardial infarction, elicited by a new computerised version of the Raven Coloured PM 47 as a mental stress test, *Funct Neurol.*, 10(4-5), 195-201, (1995)
- 17) Berger R. D. Akselrod S., Gordon D. and Cohen R. J.: An Efficient Algorithm for Spectral Analysis of Heart Rate Variability, *IEEE Tran on Biomedical Engineering*, 33(9), 900-904, (1986)
- 18) 渡邊賀子: 冷えと養生, 漢方と最新治療, 8(4), 359-363, (1999)
- 19) 向大輔, 小山秀紀, 野呂影勇: 振幅確率密度関数を用いたボールペン使用に伴う筋活動の評価, *日本生理人類学会誌*, 11(3), 105-111, (2006)
- 20) 安藤敏弘, 成瀬哲哉, 坂東直行: 人体負荷を考慮した家具の最適設計 (第2報) 椅子のサイズ実験, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 6, 1-12, (2004)

Head-care Robot using qualitative and quantitative evaluation

Takeshi ANDO^{1,2†}, Maki TAKEDA²,
Kenji YAMADA², Yuko OHNO², Yukio HONDA^{2,3}

¹Panasonic Corporation, ²Osaka University, ³Osaka Institute of Technology

Abstract We have developed a head care robot equipped with scrubbing fingers. This robot assists with hair washing and scalp care in hospitals or care facilities, and it eases the burden of healthcare professionals and care workers while it brings frequent hair washing and a higher Quality Of Life (QOL) to patients and others in need of nursing care. Based on the quantitative evaluation on relaxation and cleanness and qualitative evaluation, the head care robot is improved. As a result, firstly, a closed five link mechanism is developed to expand the range of motion of the end-effector. Secondly, virtual compliance control system is implemented to realize the comfortable head care.

Key Words: Robot, Shampoo, Massage, Cleanness, Comfort

[†] Panasonic Corporation, 2-7, Matsubacho, Kadoma-city, 571-8502 Japan, Tel: 050-3487-0152, Fax: 06-6901-5606, E-mail: ando.takeshi@jp.panasonic.com, takecando@gmail.com