

接触摺動洗浄機能を有するヘッドケアロボットの開発

Development of Head Care Robot Equipped with Scrubbing Fingers

廣瀬 俊典
Toshinori Hirose

安藤 健
Takeshi Ando

進藤 誠元
Tomoyuki Shindo

藤岡 総一郎
Soichiro Fujioka

水野 修
Osamu Mizuno

要 旨

人の指を模した接触子で頭髪をこすり洗い（接触摺動（しゅうどう）洗浄）するヘッドケアロボットを開発した。このヘッドケアロボットは、病院・介護施設における洗髪や頭皮ケアをアシストし、施術者の負担軽減と洗髪頻度向上による被施術者のQOL（Quality Of Life）向上を目的とする。自動調芯による頭部形状への追従と単一の電動モータによる複数の接触子への駆動力伝達を実現する円筒ラック機構、押圧・伸縮動作を実現し広範囲な頭部領域への接触を可能とする五節閉リンク機構、後頭部の支持・洗浄を両立するための双腕協調動作による後頭部押圧力制御などの要素技術を構築した。また、生体情報を用いてヘッドケアロボットによる洗髪の性能を定量評価することで、人による洗髪と同程度の洗浄性および快適性が得られることを確認した。

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. Several elemental technologies for this robot are listed below: a cylindrical rack mechanism for self-aligning and drive-force transmission from an electric motor to multiple fingers, a five-bar closed link mechanism to expand the head scrubbing area by extension motion, and a rear pressure force control by coordinated double arm motion to switch between supporting and washing a head. Quantitative evaluation using biological information reveals that the cleanness and comfort provided by the head care robot are the same level as that provided by a person.

1. はじめに

清潔保持は人間の基本的欲求の1つであり、看護・介護分野において患者・要介護者の身体を清潔に保つ清潔ケアは、生理学側面だけではなく、身だしなみやリラクゼーション効果といった社会的・心理学の両側面からも大きな意義をもつ[1]。洗髪は清潔ケアの一種であるが、施術者の業務負担が大きいなどの理由で、洗髪回数が理想とされる回数よりも少ないのが現状である[2]。

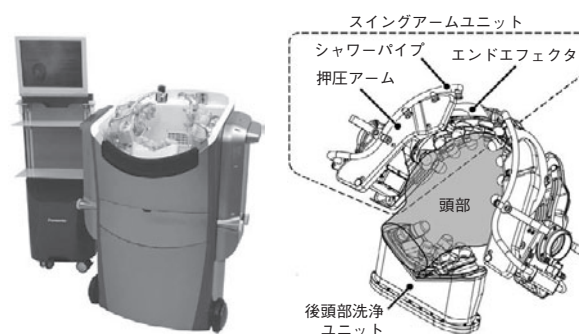
そこで、人の指を模した接触子で頭髪をこすり洗い（接触摺動洗浄）するヘッドケアロボットを開発した。このヘッドケアロボットは、病院や介護施設における洗髪などの清潔ケアをアシストし、洗髪施術者の負担軽減と洗髪頻度向上による被施術者のQOL向上を実現することを目的とする。本稿では、開発したヘッドケアロボットとその主要要素技術、洗浄性・快適性の評価について紹介する。

2. ヘッドケアロボットの概要

ヘッドケアロボットは「人に優しく触れ、泡でキレイに洗浄」をコンセプトに開発したロボットである。人が洗髪する場合と同様にシャンプーをムース状に泡立て、

指を模した接触子で接触摺動洗浄することにより、手洗いされているかのような感覚が得られるのが特長である。

ヘッドケアロボットの外観と構成を、第1図に示す。本体寸法はW810×H1045×D723 mm、本体質量は約100 kgである。ヘッドケアロボットは大きく分けて接触摺動洗浄を実現する2つのスイングアームユニットと後頭部洗浄ユニットから構成され、スイングアームユニットはエンドエフェクタと押圧アーム、シャワーパイプから構成されている。



第1図 ヘッドケアロボットの外観と主要部の構成
Fig. 1 Appearance and main structure of head care robot

ヘッドケアロボットは、水流による自動洗髪装置[3]と比較して、接触摺動によるもみほぐし効果、汚れ落ちの促進効果、湯水・シャンプーの削減効果などが期待される。

3. ヘッドケアロボットの要素技術

人に代わりロボットが洗髪を行うためには、個人によって異なるさまざまな頭部の形状へ対応できること、頭部のほぼすべての領域を洗浄することができること、安楽な姿勢を保ちつつ頭部の支持・洗浄を両立できることなどの課題が存在する。本章では、それらの課題を解決するヘッドケアロボットの主要要素技術について紹介する。

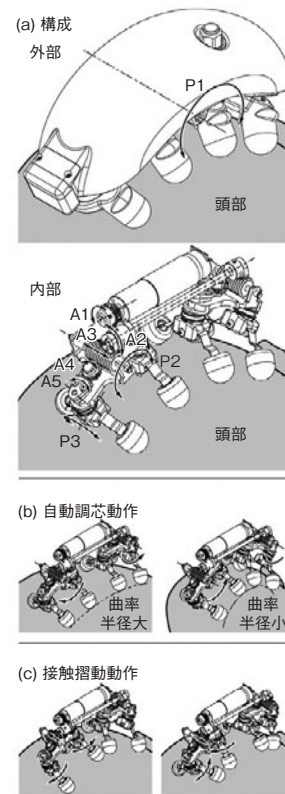
3.1 円筒ラック機構による接触摺動洗浄

複数の接触子を有するエンドエフェクタが人の頭部へ優しく触れるためには、個人によって異なるさまざまな頭部の形状に倣って接触する必要がある。駆動関節を増やして頭部の形状に倣わせることもできるが、制御が複雑になり、アクチュエータ数も多くなるため、ヘッドケアロボットでは駆動力をもたない受動関節を利用した自動調芯系と円筒ラック機構を用いた駆動系を採用している。

エンドエフェクタの構成と動作を、第2図に示す。第2図(a)には、対称構造のため代表的な1軸ずつを示しているが、P1～P3の関節が自動調芯系の受動関節、A1～A5は電動モータによって駆動される能動関節である。また、円筒形状に歯切りをしたA3が円筒ラックである。

自動調芯系については、1つのエンドエフェクタの中にP1関節1軸、P2関節2軸、P3関節4軸の計7軸の受動関節が組み込まれ、これらの受動関節はトーナメント状に接合されており、さまざまな曲率の曲面や凹凸に三次元的に倣うことができる。なお、自動調芯系は河内らによって開発された平均人頭模型&データ女性版[4]を参考に設計されており、設計曲率半径は約76 mm、最大曲率半径は約110 mm、最小曲率半径は約56 mmとなっており、これは日本人成年男女のほぼすべてに対応できる。

駆動系については、第2図(a)に示しているA1の軸を電動モータが駆動し、A2のドライブシャフトへ動力を伝達する。A2のドライブシャフトはA3の2つの円筒ラックにそれぞれ動力を伝達し、回転運動から直線運動への変換を行う。A3の2つの円筒ラックはA4の4つの中間ギヤを介してA5の4つの駆動関節にそれぞれ動力を伝達し、直線運動から回転運動への再変換を行う。P2の受動関節の回転軸と同軸に円筒ラックを配置することで、P2の受動関節周りのA4の駆動関節の回転移動によ



第2図 円筒ラック機構を搭載したエンドエフェクタ

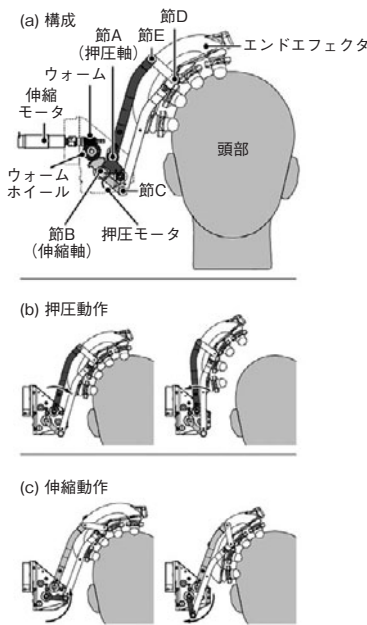
Fig. 2 End effector with cylindrical rack mechanism

らず駆動力伝達が可能となり、第2図(b)のように自動調芯動作を実現しつつ、第2図(c)のように単一の電動モータの駆動系による接触摺動動作を実現する低コストの伝達系を構成している。

3.2 五節閉リンク機構による洗浄領域移動

頭部のほぼすべての領域を洗浄するためには、エンドエフェクタの接触摺動する洗浄領域を移動させる必要がある。基本動作確認のため先行開発してきた洗髪ロボット[5]では、スイングアームユニットのスイング動作のみにより洗浄領域を移動させていたが、頭部の中央付近の領域に接触できず、洗浄できないという課題が存在した。そこで、ヘッドケアロボットではスイングアームユニットのスイング動作に加えて、押圧アームの伸縮動作を用いることで洗浄領域の移動の自由度を向上させ、頭部の中央付近の領域の洗浄を可能にしている。

押圧アームはエンドエフェクタを支持し、頭部に対して接近・離脱させるための部分である。押圧アームの構成と動作を、第3図に示す。なお、第3図では説明のため押圧アームのカバーを外した状態を図示している。押圧アームは節A～Eを節とする五節閉リンク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



第3図 五節閉リンク機構を搭載した押圧アーム
Fig. 3 Pressing arm with five-bar closed link mechanism

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、後述の押圧力制御を行っている。押圧軸を押圧モータで駆動することで、第3図(b)のような押圧動作を実現し、エンドエフェクタを頭部に接近・離脱させることが可能である。また、伸縮軸をウォームとウォームホイールを介して伸縮モータで駆動することで、第3図(c)のような伸縮動作を実現し、頭部の中央付近の領域にエンドエフェクタを接触摺動させることが可能である。なお、約34 mmの伸縮動作が可能であり、平均人頭模型&データ女性版[4]において、ほぼすべての頭部領域をカバーすることができる。

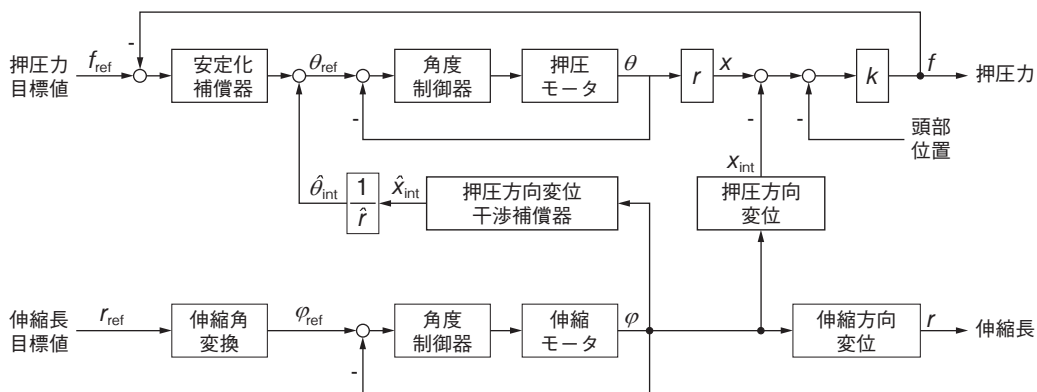
押圧アームの押圧力・伸縮長の制御ブロック図を、第

4図に示す。なお、押圧角は、第3図における節A（押圧軸）の角度、伸縮角は節B（伸縮軸）の角度、伸縮長は節Aと節Dを両端とする線分の長さをそれぞれ示す。押圧モータと伸縮モータには、それぞれPID角度制御系によりレギュレータを実現している。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って押圧力 f を検出し、押圧モータの角度制御系の押圧角目標値 θ_{ref} 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として、一次遅れ要素を挿入している。また、伸縮長目標値 r_{ref} に応じて、伸縮モータの角度制御系の伸縮角目標値 ϕ_{ref} を算出している。伸縮角 ϕ は伸縮長 r だけではなく押圧方向の変位の影響 x_{int} が生じる。そこで、押圧方向変位干渉補償器により押圧方向の変位 \hat{x}_{int} を推定し、押圧角目標値 θ_{ref} へ加算することで伸縮角 ϕ の変化による押圧方向の変位への干渉 x_{int} を抑制している。押圧方向変位干渉補償器により、押圧制御の誤差変動を約20%から約10%まで低減することができた。

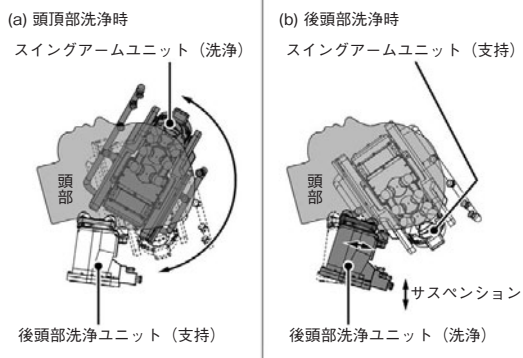
3.3 双腕協調動作による後頭部押圧力制御

安楽な姿勢を保ちながら洗髪を行うためには、後頭部を支持しながら洗浄するのが望ましい。しかしながら、支持部の後頭部を洗浄するためには、頭部の支持・洗浄の両立を実現する必要がある。そこで、ヘッドケアロボットでは後頭部の支持・洗浄を両立する後頭部洗浄ユニットを備え、後頭部洗浄時に左右のスイングアームユニットの双腕協調動作により頭部を支持することで、後頭部の押圧力制御を実現している。

頭頂部洗浄時と後頭部洗浄時のスイングアームユニットと後頭部洗浄ユニットの動作を、第5図に示す。頭頂部洗浄時には、第5図(a)のように後頭部洗浄ユニットを用いて頭部を支持し、左右のスイングアームユニット



第4図 押圧アームの押圧力・伸縮長制御
Fig. 4 Pressing force and extension length control of pressing arm



第5図 スイングアームユニットと後頭部洗浄ユニットの動作
Fig. 5 Motion of swing arm unit and rear unit

をスイング動作させることで洗浄領域を移動させながら洗浄する。一方、後頭部洗浄時には、第5図 (b) のように左右のスイングアームユニットを用いて頭部を支持し、後頭部洗浄ユニットにかかる頭部の重量を緩和することで、適切な押圧力を後頭部へ与えながら揺動動作させることで洗浄領域を移動させながら洗浄する。なお、後頭部洗浄ユニットにはサスペンションが内蔵されており、頭頂部洗浄時には後頭部洗浄ユニットにかかる頭部の重量によりストロークリミットに押し当てられた状態になっているが、後頭部洗浄時にはその重量が緩和されるため、サスペンションが有効となる。

後頭部洗浄時においては、後頭部洗浄ユニットの押圧力を力センサで検出し、左右のスイングアームユニットを双腕協調させて頭部を支持させることで、後頭部に所定の押圧力が与えられるようになっている。後頭部洗浄時の双腕協調動作による後頭部押圧力制御を、第6図に示す。

左右の押圧モータは、前節で述べた通り、それぞれPID (Proportional Integral Derivative) 角度制御系により

レギュレータを実現している。後頭部洗浄ユニットに組み込まれた力センサによって押圧力 F を検出し、左右の押圧モータの角度制御系の押圧角目標値 θ_{Lref} 、 θ_{Rref} を操作することで押圧力のサーボ系を構成している。頭部の凹凸などにより左右の頭部形状が異なると、左右の押圧モータへの負荷バランスが悪く、片側の押圧モータが過負荷になってしまう場合がある。そこで、左右のエンドエフェクタの力センサで検出された押圧力 f_L 、 f_R の差分をもとに算出された $\hat{\theta}_{bal}$ を右側の押圧角目標値 θ_{Rref} に加算してバランス補償を行うことで、左右の押圧モータへの負荷を分散することができる。

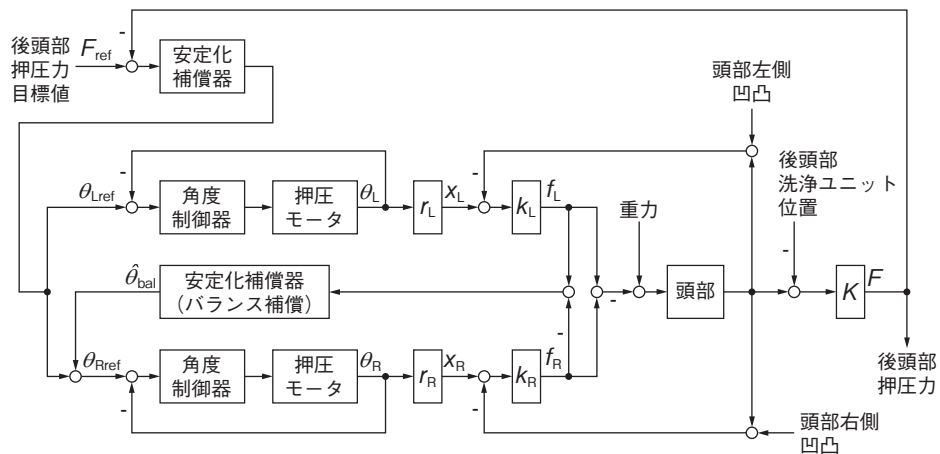
4. ヘッドケアロボットの性能評価

ヘッドケアロボットに求められる洗浄性と快適性の2つの項目について、生体情報を用いて性能評価を行った。本章では、その性能評価手法と結果について紹介する。

4.1 洗浄性評価

洗髪を行う際の最も基本的な要求性能は、汚れが落ちているかという洗浄性である。本節では、押圧アームに伸縮の自由度が追加されたヘッドケアロボットの洗浄性を、人による洗髪の洗浄性および押圧のみのロボットによる洗髪の洗浄性と比較する。

健常者27人を人による洗髪群 (9人)、従来の押圧のみのロボットによる洗髪群 (9人)、新たな押圧+伸縮のロボットによる洗髪群 (9人) に分け、それぞれ洗髪を行い、洗髪の前後で汚れの量を計測した。すべて時間は約5分とし、同量のシャンプーを用いた。ただし、人による洗髪群は看護師による洗髪とした。また、被験者には測定前夜および当日の洗髪、当日の整髪料使用、過度な運動



第6図 双腕協調動作による後頭部押圧力制御
Fig. 6 Rear pressing force control by double arm coordinated motion

を禁止した。

本実験では汚れを菌・皮脂などの量とし、生命活動によるATP (Adenosine Triphosphate, 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 (キッコーマンバイオケミファ (株)) 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。

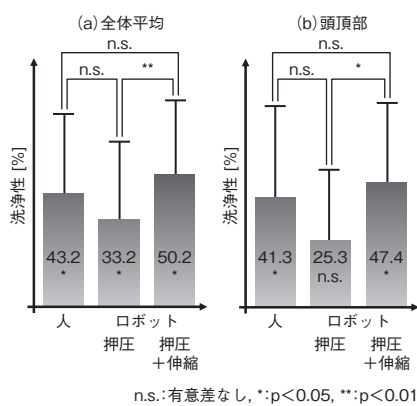
洗浄度は以下のように定義し、100%に近いほど完全に汚れが落ちたことを示す。

$$\text{洗浄性 (\%)} = \frac{\text{洗髪前ATP量} - \text{洗髪後ATP量}}{\text{洗髪前ATP量}} \times 100$$

第7図に (a) 5部位を平均した洗浄性、(b) 伸縮自由度がない場合に左右スイングアームユニットの境界領域となる頭頂部での洗浄性を示す。ただし、エラーバーは標準偏差を示す。

第7図 (a) に示すように、全体平均では、どの洗髪方法であっても洗髪前と比べると有意に洗浄されていた (5%水準, 対応のあるt検定)。ただし、洗浄度はロボット (押圧+伸縮) による洗髪、人による洗髪、ロボット (押圧のみ) による洗髪の順に高くなった。また、ロボットの押圧のみの洗浄度と、押圧と伸縮を併用したときの洗浄度には有意差があった (1%水準, ANOVA検定後にBonferroni法による多重比較)。

一方、第7図 (b) に示すように、頭頂部では、人による洗髪とロボット (押圧+伸縮) による洗髪ではそれぞれ洗髪前後で有意に汚れが減少していることがわかったが、ロボット (押圧のみ) の場合は洗髪前後での有意な変化はなく、洗浄できていなかった (5%水準, 対応のあるt検定)。ロボット (押圧+伸縮) と比較すると、押圧のみの従来機で洗浄が困難であった頭頂部において洗浄度が約20%改善し、有意な改善が確認できた (5%水



第7図 洗髪の前における洗浄性変化
Fig. 7 Cleanliness change by washing hair

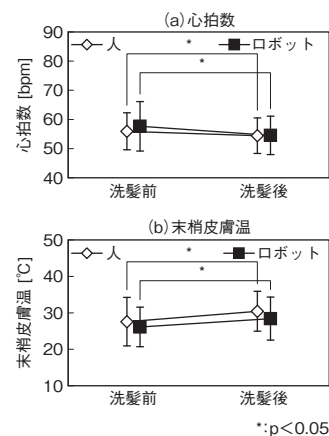
準, ANOVA検定後にBonferroni法による多重比較)。よって、伸縮自由度の追加が洗浄領域の拡大および洗浄性の向上に寄与することが示された。

4.2 快適性評価

単なる身体的清潔さに加えた洗髪の付加価値として、頭皮エステのようにもみほぐすことにより精神的にもリラックスできるという快適性がある。本節では、自律神経系の生理学指標を用いて、頭部に優しく接触するヘッドケアロボットの快適性を評価する。

健常者18名が、ロボットによる洗髪、人による洗髪の2条件をランダムな順番で5分間行った。各試行の間には十分な時間をおいた。計測する生理指標は、リラックス度の代表的指標である加速度脈波、血圧、心拍数、唾液アミラーゼ、末梢皮膚温とした。計測は洗髪の前後の10分間の安静時間に仰臥位にて行った。洗髪の前で指標に変化があるかを、Wilcoxonの符号付順位和検定で解析した (5%水準)。

人による洗髪とロボットによる洗髪とも、洗髪の前で心拍変動解析における交感神経系指標SDNN^(注1)、HF^(注2)、副交感神経系指標LF/HF^(注3)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。第8図 (a) に示すように、心拍数は人の場合は2拍/分、ロ



第8図 洗髪の前における心拍数と末梢皮膚温の変化
Fig. 8 Heart rate and peripheral skin temperature change by washing hair

(注1) SDNNはRR (心拍) 間隔の標準偏差であり、副交感神経活動の指標

(注2) HFはRR間隔の変動を周波数解析した際の0.15 Hz - 0.4 Hzのパワー、副交感神経活動の指標

(注3) LF/HFはLF (0.04 Hz - 0.15 Hzパワー) とHFの比であり、交感神経活動の指標

ポットの場合は3拍/分有意に低下した。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、第8図 (b) に示すように、人で2.9℃、ロボットで2.3℃有意に上昇した。ただし、エラーバーは標準偏差を示す。

以上より、

- ・心拍数の低下
- ・抹消皮膚温の上昇

というリラックス指標の改善が確認でき、副交感神経系が優位になっていることがわかる。また、3℃近い手先温度上昇は、20分間の足湯と同じ効果であり[6]、高いリラックスかつ血液循環促進の効果である。

以上の傾向は、人・ロボットで同様であり、ヘッドケアロボットに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。

5. まとめ

本稿では接触摺動洗浄機能を有するヘッドケアロボットの開発について紹介した。自動調芯による頭部形状への追従と単一の電動モータによる複数の接触子への駆動力伝達を実現する円筒ラック機構、押圧・伸縮動作をコンパクトに実現し広範囲な頭部領域への接触可能とする五節閉リンク機構、後頭部の支持・洗浄を両立するための双腕協調動作による後頭部押圧力制御などの要素技術を構築した。また、生体情報を用いてヘッドケアロボットによる洗髪の性能を定量評価することで、人による洗髪と同程度の洗浄性および快適性が得られることを確認した。

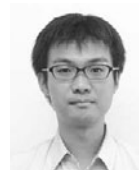
今後さらなる改良を行い、病院や介護施設での洗髪をアシストし、洗髪施術者の負担低減と洗髪頻度向上による被施術者のQOL向上を実現すべく、商品の実用化に向けて注力していく。

ヘッドケアロボットの性能評価にあたり、ご協力いただいた大阪大学大学院 医学系研究科保健学専攻の大野ゆう子教授、山田憲嗣教授に深謝する。

参考文献

- [1] ヴァージニア・ヘンダーソン, “看護の基本となるもの,” 日本看護協会出版会, 1995.
- [2] 蝦名恵 他, “臥床が必要とされる患者の洗髪回数と洗面用具についての実態調査,” 十和田市立中央病院研究誌, vol.14, no.1, pp.60-62, 1998.
- [3] 坂根鉄男 他, “全自動洗髪機の開発,” SANYO TECHNICAL REVIEW, vol.8, no.1, pp.45-53, 1975.
- [4] 河内まき子 他, “日本人頭部寸法データベース2001,” 産業技術総合研究所H16PRO-212, 2008.
- [5] Toshinori Hirose et al., “Development of hair-washing robot equipped with scrubbing fingers,” 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1970-1975, 2012.
- [6] 渡邊賀子, “冷えと養生,” 漢方と最新治療, vol.8, no.4, pp.359-363, 1999.

執筆者紹介



廣瀬 俊典 Toshinori Hirose
モノづくり本部 生産技術開発センター
ロボット技術開発グループ
Robot Development Group, Production
Engineering Development Center, Global
Manufacturing Div.



安藤 健 Takeshi Ando
モノづくり本部 生産技術開発センター
ロボット技術開発グループ
Robot Development Group, Production
Engineering Development Center, Global
Manufacturing Div.
博士 (工学)



進藤 誠元 Tomoyuki Shindo
モノづくり本部 生産技術開発センター
ロボット技術開発グループ
Robot Development Group, Production
Engineering Development Center, Global
Manufacturing Div.



藤岡 総一郎 Soichiro Fujioka
モノづくり本部 生産技術開発センター
ロボット技術開発グループ
Robot Development Group, Production
Engineering Development Center, Global
Manufacturing Div.



水野 修 Osamu Mizuno
モノづくり本部 生産技術開発センター
ロボット技術開発グループ
Robot Development Group, Production
Engineering Development Center, Global
Manufacturing Div.