

静音かつ家庭内に導入可能な接触型ロボットの開発

Development of a low-noise and home-use touch robot

光岡 稜真^{1*} 窪田 智徳¹ 佐藤 理史¹ 小川 浩平¹

Ryoma Mitsuoka¹ Tomonori Kubota¹ Satoshi Sato¹ Kohei Ogawa¹

¹ 名古屋大学大学院工学研究科

¹ Graduate School of Engineering, Nagoya University

Abstract: 接触型ロボットの家庭への導入が求められている。導入のためには、動作音が静かかつ機材がコンパクトで、十分な力で接触できるロボットが必要だが、現状ではほとんど考慮されていない。そこで本稿では、上記の条件を満たせるような接触型ロボットを開発した。予備実験を通じて、開発したロボットは動作音が十分静かで、タッピングや撫でといった触り方ができることを確認した。

1 序論

接触型ロボットを用いたユーザとロボット間の接触インタラクションはユーザにポジティブな効果を及ぼすことが報告されている。特に、ロボットからユーザに接触することで、モチベーションの向上 [1] や、参加者の緊張の緩和 [2]、心拍数の減少 [3] といった効果をユーザに与えることができる。このような接触型ロボットを家庭内に導入できると、ロボット-ユーザ間の接触の機会が増えるため、よりユーザへの接触によるポジティブな効果を与えやすくなると考えられる。

ユーザに触ることが可能な接触型ロボットを家庭に導入するためには、そもそもロボットの動作システムが家庭内に設置可能で動作できる必要がある。具体的には、動作させるための機材はコンパクトである必要がある。もし、機材が大きい場合、接触型ロボットを家庭内に配置することは厳しい。

加えて、接触型ロボットを家庭内に配置するためには、ロボットの動作音が静かである必要がある。ロボットは動作すると、パーツ同士が擦れや制御入力による振動などさまざまな要因によって、動作音を発する。この動作音は、ロボット-ユーザ間のインタラクションに悪影響を及ぼす可能性がある。例えば、Tennentら [4] によると、ロボットの動作音があることによって信頼性、美的評価、人間らしさを損なうことがわかっている。そのため、この動作音を可能な限り軽減することが必要である。

さらに接触型ロボットは、ユーザに危害を加えることなく、ユーザがロボットから触られていると感じられ

る程度の力で接触できる必要がある。ロボットがユーザに触る力が強すぎる場合は、ユーザに怪我を負わせてしまう可能性がある。対して、力が弱すぎる場合、ユーザがロボットから触られているように感じにくくなってしまふ可能性がある。例えば、ロボットがユーザを撫でる接触をするためには、ロボットとユーザとの間に生じる摩擦力以上の力が必要となる。もし、ロボットのアクチュエータの出力が小さい場合、ユーザとの間の摩擦力に負けて、その場から動かずに停止してしまう。この場合、ユーザは“ロボットに撫でられた”とは感じにくく、ロボットはユーザに撫でる接触によるポジティブな効果を提供できない。そのため、接触型ロボットは適切な力で接触できるようなアクチュエータまたは機構をもつ必要がある。

まとめると、接触型ロボットを家庭に導入するためには、ロボットが以下の要件を満たす必要があると考える。

要件 1 占有スペースが狭く、家庭内でも動作可能である

要件 2 動作音が不快にならない程度に静かである

要件 3 ユーザに十分な力で接触できる

これまでのロボットで上記 3 要件を満たすロボットは現状少ない。上記三つの要件を満たす可能性があるロボットとして、マイクロテック・ラボラトリー株式会社と株式会社キビテクが開発した小型ロボットアーム Kohaku¹が挙げられる。ただし、このロボットアームは接触型ロボットとしては想定されてないことに加えて、重量が 15kg と重たい。そこで本稿では、上記三つの要件を満たせる、ぬいぐるみのような柔らかい外

*連絡先：名古屋大学大学院工学研究科
〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町
E-mail: mitsuoka.ryoma.t5@s.mail.nagoya-u.ac.jp

¹研究者の為のカスタム可能な小型ロボットアーム Kohaku
<https://motor.mtl.co.jp/amber.html>, Accessed: 2024-02-11

装を持つ接触型ロボットの腕を開発した。予備実験を通じて、開発したロボットが上記要件を満たしているかを確認する。

2 関連研究

2.1 家庭内に導入可能なぬいぐるみロボット

ぬいぐるみロボットは小型であり家庭内に配置しやすい動作しやすい。また、柔らかい構造であるため、過度な力をユーザに与えにくいというメリットがある。本節ではぬいぐるみロボットについて述べ、それらが要件3を満たせてない可能性があることを述べる。

これまでに、ぬいぐるみの手足に縫い付けた糸を引くことで手足を動作させるロボットが研究されている[5]。糸の駆動は、ロボットの内部に搭載された小型のモータによって糸を巻き取ったり引き出したりすることで行われる。このロボットは小型であり、家庭内に導入可能であるため、要件1を満たすことができると考える。

また、家庭にあるぬいぐるみをロボット化する試みも提案されている。杉浦らは、ぬいぐるみの手足に後付け可能なリング型のデバイスを開発した[6]。デバイスの内部にあるサーボモータを稼働させ、表面の布生地を引き込み具合を調整することで、ぬいぐるみの手足を左右に動作させることができ、ぬいぐるみをロボット化することができる。このデバイスを取り付けたぬいぐるみロボットも、家庭内に導入可能であるため、要件1を満たすことができると考える。

しかしながら、上記のロボットやロボット化するデバイスは、ユーザに接触することが想定されていない。ぬいぐるみ等の芯まで柔らかい手足は変形しやすく、外力に負けやすい安全な機構ではある。その反面、十分な力で接触するには不十分な可能性がある。糸駆動機構を用いたロボットでユーザとの握手については実現されているが[7]、撫でといったその他の触り方では、現時点で実現されていない。このことから、ぬいぐるみを用いたロボットは要件1を満たすものの、要件3を十分に満たさないと考える。

2.2 ロボットに使用するアクチュエータ

本節では、要件2の静音さを満たすためのロボットに必要なアクチュエータについて言及する。また、言及した動作音が静かなアクチュエータの中から、今回開発するロボットにはブラシレスモータと波動歯車減速機を採用することを述べる。

静かなアクチュエータとして、これまでにMcKibben[8]などの空気の圧力で動作するアクチュエータが研究さ

れている。このアクチュエータは機械的に擦れる箇所が少なく動作音が小さいため、ロボットの動作音を小さくすることができる。しかしながら、このアクチュエータの動作のためにはエアコンプレッサが必要となる。エアコンプレッサは動作中に大きな騒音を発するため、ユーザから遠くに配置する必要がある。そして、ロボットに圧縮した空気を送るために、コンプレッサからロボットまでをエアチューブで配線する必要がある。この場合、接触型ロボットが家庭内の大きなスペースを占有してしまう。このことから、空圧で動作するアクチュエータを用いたロボットは、要件2を満たすものの、要件1を十分に満たさないと考える。

他にも、形状記憶合金をはじめとした、機能性合金を用いたアクチュエータが研究されている。形状記憶合金とは、変形後に温めると元の形に戻る性質をもつ合金である。形状記憶合金を用いたアクチュエータとして、ストローク運動を行うアクチュエータが存在する[9]。形状記憶合金の変形には機械的な摩擦がないため、音の発生がなく、要件2を満たすことができる。しかし、我々の予備的調査で、形状記憶合金の熱を加えたことによる復元力は数N程度であり、接触には不十分であることが分かっている。このことから、形状記憶合金等を用いたアクチュエータを使用したロボットは要件2を満たすものの、要件3を十分に満たさないと考える。

ここで、モータについて検討する。モータはロボットのアクチュエータとして広く使われている。ロボットからの接触した際の効果を調べるために過去の研究で使用されたロボットも、モータを用いている。例えば、Moffuly-IIはサーボモータという種類のモータが使用され[10]、Pepperでは上半身にブラシ付きモータという種類のモータが使用されている[11]。しかし、サーボモータやブラシ付きモータはその構造上、動作音がうるさく、静かなロボットを作る上では好ましくない。

また、ロボットを動作させる上で、モータ単体ではトルクが足りない場合は、遊星歯車減速機が併用されてきた。例えば、NAOがこれに該当する[12]。しかし、この減速機もその構造上、大きな動作音を発生させやすく、静音性が求められるロボットには望ましくない。

このように静かなロボットを作る上で、サーボモータやブラシ付きモータ、遊星歯車減速機は望ましくないが、モータや減速機の中でも動作音が静かなものが存在する。モータの中でもブラシレスモータは、ブラシがないという構造上、サーボモータやブラシ付きモータと比較すると動作音を抑えることが可能である。減速機の中で静音性が高いものとして、波動歯車減速機が挙げられる²。この知見をもとに、本稿で開発するロボットはアクチュエータにブラシレスモータと波動歯

²ハーモニックドライブ[®]を知る https://www.hds.co.jp/products/hd_theory/, Accessed: 2024-02-11

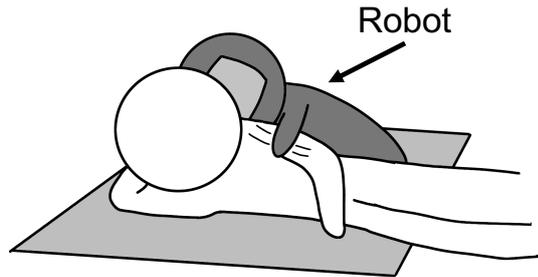


図 1: 完成イメージ図

車減速機を使用する。

3 ロボットの構成

3.1 ロボットの構想

本研究で開発するぬいぐるみのような柔らかい外装を持つ接触型ロボットは、図 1 のようにユーザが寝る姿勢を取っているときに、接触するものを想定している。本稿では、図 1 のうち、腕にあたる機構のみを開発する。

本稿で提案する接触型ロボットは、上記三つの要件を満たすこと以外に、ユーザに複数種類の触り方で接触できるものを目指す。これは、インタラクションが単調になってしまい、ユーザが飽きてしまうことを防ぐためである。触り方の種類を増やすためには、ロボットの腕は 3 次元的に姿勢を変えることが可能な機構が望ましい。ロボットの腕を 3 次元的に動かすためには、少なくとも 3 自由度が必要である。ロボットの機構の自由度を上げることでロボットの触り方の種類を増やすことはできるが、その反面、アクチュエータの増加による高コスト化とメンテナンスの複雑さにもつながる。そのため、ロボットの腕の自由度は 3~6 程度を目標とし、4 自由度の腕機構を開発した。

また、本接触型ロボットは素早く動作することを想定していない。これは Etzi らの研究 [13] で、人にゆっくり撫でられる接触が、速く撫でられる接触と比較して、リラックスできることが報告されているためである。Etzi らの研究のゆっくり撫でる条件の速度が 0.03 m/s であるため、本稿で開発するロボットは余裕をもって 0.09 m/s 程度で接触できるようにアクチュエータを選定した。

3.2 開発した接触型ロボット

図 2 に開発した接触型ロボットを示す。ロボットは 4 自由度であり、姿勢保持にモータを四つ、手先の駆動

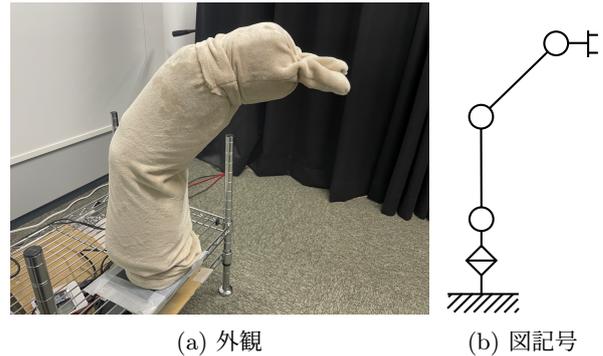


図 2: 開発した接触型ロボット



図 3: 開発した接触型ロボットの構造。内側から 3D プリンタで作成されたフレーム、ウレタンチップスポンジ、布生地で構成されている。

にモータを一つ使用している。大きさは 105×130×610 mm であり、重量はおよそ 2 kg である。

ロボットは図 3 に示すように 3 層構造になっている。内側に 3D プリンタで作成されたフレームがあり、その上から柔らかいウレタンチップスポンジ、布生地を被せている。布生地には、ぬいぐるみなどで用いられる、伸縮性の高いポア生地を採用した。

本ロボットの腕の機構は試作機であるため、ロボットの駆動に使うコントローラ基板や電源装置は、開発用のものを使用し、ロボットの外に露出している。ただし、将来的にこれらは小型化して、ロボットの内部に格納することが可能である。

表 1 に各関節の稼働範囲と使用したモータの詳細を示す。ブラシレス DC モータは EC 45 flat 30W と KM-1S-M4625 の 2 種類を採用した。前者のモータは、maxon 社製のモータで、定格 12 V で最大連続電流が 2.16 A、最大連続トルクが 57.1 mNm のブラシレス DC モータである。このモータには、波動歯車減速機を搭載している。具体的には、ハーモニック・ドライブ・システムズ社製のハーモニックドライブ CSF-8-100-2UH-ULW (減速比 100) を搭載している。このモータと減速機は、ロボットの構造上トルクが必要となる 2 箇所に採用した。本モータは、停動トルク 263 mNm であ

表 1: アクチュエータ構成

	稼働範囲	使用アクチュエータ
第 1 関節	-80°- 80°	KM-1S-M4625
第 2 関節	-140°- 0°	EC 45 flat 30W + CSF-8-100-2UH-ULW
第 3 関節	-80°- 80°	EC 45 flat 30W + CSF-8-100-2UH-ULW
第 4 関節	-80°- 80°	KM-1S-M4625
手先	-	KM-1S-M4625



(a) 指を曲げた状態 (b) 指を伸ばした状態

図 4: 開発した接触型ロボットの手先

り、減速機をつけるとモータのトルクが過剰となる可能性がある。そのため、制御側でモータの入力電流を最大 3 A に制限し、最大トルクが 75 mNm 程度になるようにしている。後者のモータは、Keigan Motor 社製のモータで、5 V 2.4 A の低電力で動作可能でありつつ、停動トルクが 0.2 Nm のブラシレス DC モータである。このモータは、ロボットの構造上、大きなトルクが必要とされない 3 箇所採用した。

手先はロボットがユーザに接触する際の触り方の種類を増やすために作成された。図 4 にアーム型の接触型ロボットの手先の内部を示す。全部で 3 本指となっており、指先に結んであるテグスをモータを使って巻き取ることで、指を曲げることができる (図 4(a))。指の内部には軟質なプラスチック素材があり、その復元力で指を伸ばすことができる (図 4(b))。ただし、指は独立しておらず、全て同時に稼働する。

4 予備実験

本予備実験では、前章で開発したアーム型の接触型ロボットが、1 章に示した三つの要件のうち、要件 2, 3 を満たすか検証した。なお、要件 1 については、それを満たすように設計できたと考え、本予備実験では調査しない。



図 5: 実験状況



図 6: 予備実験で使用したタッピングのモーション

4.1 実験概要

本予備実験では、図 5 のように、実験参加者に接触型ロボットの横に寝てもらい、接触型ロボットが参加者の脇腹に触る状況を用意した。このような状況下で、ロボットの動作が静かであるか、ロボットが想定した接触を参加者に行うことができているかを調査した。もし、参加者がロボットの動作が静かだ、または気にならないと感じている場合、接触型ロボットは要件 2 を満たしているとみなすことができる。また、ロボットが実験者の想定通りに触ることができている場合は、接触型ロボットは要件 3 を満たしているとみなすことができる。

接触型ロボットの参加者への触り方は、3 種類のモーション (タッピング、撫で (指の稼働なし)、撫で (指の稼働あり)) と 2 種類の速度 (遅い、速い) の組み合わせで合計 6 種類とした。タッピングは図 6 に示すような動きでタップする。遅いタッピングは 1 秒間に 0.67 回、速いタッピングは 1 秒間に 1.67 回タップする。撫で (指の稼働なし) は図 7 に示すような動きで 1 方向に撫でる。遅い撫では 0.03 m/s で、速い撫では 0.09 m/s で参加者を撫でる。撫で (指の稼働あり) は図 8 に示すような動きで 1 方向に撫でる。触り方は撫で (指の稼働なし) と似ているが、触り始めに指を曲げ、触り終わりに指を伸ばす点で異なる。



図 7: 予備実験で使用した撫で（指の稼働なし）のモーション



図 8: 予備実験で使用した撫で（指の稼働あり）のモーション

4.2 実験手順

本予備実験には、著者らと同じ研究室のメンバの大学生の4人（男性4人、年齢21～25歳）が参加した。まず、実験者は参加者に対してロボットから触られること、ロボットにどのように触られたと感じたかを教えてほしいという実験の趣旨を説明した。この際に、ロボットがどのように触るかは説明しなかった。説明後、参加者に図5のように、ロボットが見えるように横向きに寝てもらい、実験者が参加者の体格に合わせてロボットをセッティングした。

その後、参加者に全6種類の触り方でロボットから脇腹に触られる体験をしてもらい、1種類の体験ごとに、ロボットからどのように触られているように感じたか口頭で回答してもらった。参加者はそれぞれの触り方ごとに20回ロボットから触られてもらった。触り方の順番は参加者ごとにランダムである。

さらに、全ての触り方でロボットから触ってもらった後に、参加者にロボットからの接触の力加減はどうだったか、ロボットの動作音が静かだったかの二つの質問に対して、7段階評価とその理由を口頭で回答してもらった。7段階評価について、具体的にはロボットからの接触の力加減については7を強い、1を弱いとして聞いた。また、ロボットの動作音については7を静か、1をうるさいとして聞いた。

4.3 結果と考察

まず、タッピングのモーションにおける、参加者がどのように触られている感じたかの結果について報告

する。まず、遅いタッピングでは「一定のテンポと強さで、同じ場所を上から下に押し続けているように感じた」「優しく突かれているように感じた」という意見が出た。次に、速いタッピングでは「一定のテンポで刻んでいるように感じた」「早めにポンポンされているように感じた」という意見が出た。このことから、速度に関わらずロボットが参加者をタッピングできていることが推測できる。

次に、撫で（指の稼働あり・なし）のモーションにおける、参加者がどのように触られていると感じたかの結果について報告する。まず、撫で（指の稼働なし）のモーションでは、速度に関わらず、「撫でられているように感じた」「さすられているように感じた」「手のひらで触られているように感じた」という意見が出た。次に、撫で（指の稼働あり）のモーションでは、速度に関わらず、「指先で撫でられているように感じた」「体の輪郭をなぞられているように感じた」という意見が出た。このことから速度に関わらずロボットが参加者を撫でることができていることが推測できる。また、指を曲げることによってロボットの触り方を変化させることができたことが推測できる。

ここからは実験終了後に行った力加減及び動作音の静かさの結果について報告する。表2にそれぞれの質問における7段階評価の結果を示す。まず、ロボットからの接触の力加減について、表2より、4人中3人が7段階中4または3と回答していた。評定の理由を聞いたところ、「ちょうどいい、人が人を触るならこれくらいだと思う」との意見が出た。2と回答した参加者3に対して、評定の理由を聞いたところ、「（ロボットからの接触が）弱い、優しいと感じたため」と回答

表 2: ロボットの力加減及び動作音の静かさの結果

	参加者 1	参加者 2	参加者 3	参加者 4
ロボットの力加減は静かだったか？ (7:強かった, 1:弱かった)	4	3	2	4
ロボットの動作音は静かだったか？ (7:静かだった, 1:うるさかった)	4	6	5	6

していた。このことから、開発したロボットは適度な力で参加者に触ることができたと考えられるが、ユーザに合わせて少し強めに接触するように調整したほうが良いと考える。

次に、ロボットの動作音について報告する。表 2 より、全員が7段階中4以上と回答した。評定の理由を聞いたところ、「このぐらいならいいかな」や「うるさいとは思わなかった」という意見が出た。ただし、「ちょっと音が出ているなど感じた」という意見も出た。なお、6種類の触り方で発生する動作音を事後に計測したところ、45 dB 以下に抑えることができたことがわかった。ただしこの結果は、YAMAHA のマイク YVC-300 を図 5 の灰色のクッションが置いてある位置（ロボットとの直線距離で 550 mm）で収録した後に Praat で Intensity を分析した結果であり、参考値である。これらの結果から、開発した接触型ロボットの動作音は参加者が許容できるほどの音量であったと考えられる。

タッピング、撫で及び力加減の結果より、ロボットは参加者に十分な力で接触できていることが推測できる。そのため、要件 3 を満たしていたと考える。また、ロボットの動作音の結果より、ロボットの動作音は静かであり、要件 2 を満たしていたと考える。以上より、本稿で開発したロボットは 1 章で示した三つの要件を満たすことができたと考えられる。

5 まとめ

本稿では、ユーザに触ることが可能な接触型ロボットを家庭に導入するために、占有スペースが狭く家庭内で動作可能であること、動作音が不快にならない程度に静かであること、ユーザに十分な力で接触できることの三つの要件を満たす必要があると考えた。そして、これらを満たせる、ぬいぐるみのような柔らかい外装を持つ接触型ロボットの機構のうち、腕にあたる機構を開発した。開発したロボットについて、3要件のうち、ロボットの動作が静かであるか、ロボットが適度な力でタッピングや撫でといった任意の触り方でユーザに触ることができているかを調べる予備実験を実施した。その結果、開発したロボットは、三つの要件を満たすことができたと考えられる。本稿の知見は、ロボットから触ることでユーザに効果を与える接触型ロ

ボットを、家庭環境でも利用可能にするための機構の開発に寄与すると考えている。今後の展望として、接触によるストレス緩和効果をユーザに長期間与えることができるようなインタラクションデザインを考案したい。

謝辞

本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2125 の財政支援を受けた。

参考文献

- [1] Nakagawa, K., Shiomi, M., Shinozawa, K., Matsumura, R., Ishiguro, H., and Hagita, N.: Effect of robot's active touch on people's motivation, Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction, pp. 465-472 (2011).
- [2] Adachi, Y. and Tanaka, F.: Development of a Robotic Device that Performs Head Bunting to Relieve User Tension, J. Hum.-Robot Interact., Vol. 14, No. 2, pp. 20:1-20:15 (2024).
- [3] Willemse, C. J. A. M. and Erp, van J. B. F.: Social Touch in Human - Robot Interaction: Robot-Initiated Touches can Induce Positive Responses without Extensive Prior Bonding, International Journal of Social Robotics, Vol. 11, No. 2, pp. 285-304 (2019).
- [4] Tennent, H., Moore, D., Jung, M., and Ju, W.: Good vibrations: How consequential sounds affect perception of robotic arms, 2017 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), pp. 928-935 (2017).
- [5] 長谷川 晶一, 三武 裕玄: 人と触れ合うための柔軟機構とその制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 8, pp. 678-683 (2014).
- [6] Sugiura, Y., Lee, C., Ogata, M., Withana, A., Makino, Y., Sakamoto, D., Inami, M., and Igarashi, T.: PINOKY: a ring that animates your plush toys, Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 725-734 (2012).
- [7] Li, Y., Kleawsirikul, N., Takase, Y., Mitake, H., and Hasegawa, S.: Intention expression in stuffed-toy robots based on force control, Proceedings of the 11th Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, pp. 1-5 (2014).
- [8] Schulte, H. F.: The characteristics of the McKibben artificial muscle, The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics, National Academy of Science-National Research Council, pp. 94-115 (1961).

- [9] 広瀬 茂男, 生田 幸士, 佐藤 光一: 形状記憶合金アクチュエータの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 4, No. 6, pp. 618–628 (1986).
- [10] Onishi, Y., Sumioka, H., and Shiomi, M.: Moffuly-II: A Robot that Hugs and Rubs Heads, *International Journal of Social Robotics*, Vol. 16, No. 4, pp. 299–309 (2023).
- [11] Pandey, A. K. and Gelin, R.: A Mass-Produced Sociable Humanoid Robot: Pepper: The First Machine of Its Kind, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 25, No. 3, pp. 40–48 (2018).
- [12] Gouaillier, D., Hugel, V., Blazevic, P., Kilner, C., Monceaux, J., Lafourcade, P., Marnier, B., Serre, J., and Maisonnier, B.: Mechatronic design of NAO humanoid, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 769–774 (2009).
- [13] Etzi, R., Carta, C., and Gallace, A.: Stroking and tapping the skin: behavioral and electrodermal effects, *Experimental Brain Research*, Vol. 236, No. 2, pp. 453–461 (2018).