

被服の新機能を創出するスマートガーメント

—ウェアラブルソーシャルディスタンスキーパーの開発—

古川 貴雄

1. はじめに

脳と皮膚は外胚葉から分化していることから、皮膚は「露出した脳」と呼ばれることもある。fMRIを用いた研究により、快適と感じる触覚刺激はC線維を活性化することが示され、触覚刺激がC線維から情動の表出に深く関与する大脳辺縁系に伝達されることが明らかにされている¹⁾。ソフトブラシを用いた触覚刺激の反応に関する研究では、被験者が快適に感じる触覚刺激の提示方法が示されている²⁾。また、母親が新生児を胸で抱擁するカンガルーマザーケアでは、皮膚による接触刺激によって新生児の健康状態が改善されることも示されている³⁾。

我々のコミュニケーションには言語と非言語の要素があり、非言語コミュニケーションには、性別・年齢・体格等の身体の属性や、身振り・手振りなどの身体動作、声のトーンに代表される音声情報に加えて、身に着ける被服の情報も含まれる⁴⁾。さらに、握手、抱擁などの触覚を介したコミュニケーションも非言語コミュニケーションに含まれ、日常生活における円滑なコミュニケーションを促進する重要な役割を果たしている。

新型コロナウイルス感染症の感染拡大により、ソーシャルディスタンスを維持し、握手、抱擁などの肌を介したハプティックコミュニケーションを避けることが求められるようになった。このような新たな生活様式は、我々のコミュニケーションにおいて重要な役割を果たすハプティックコミュニケーションを阻害する要因となっている。本研究では、新型コロナウイルス感染症の感染を防止するために、ソーシャルディスタンスを維持した遠隔のハプティックコミュニケーションを実現するスマートガーメントのシステム・ファッションデザインについて多面的に検討し、実際にプロトタイプを制作する。

ウェアラブルなハプティックコミュニケーションを実現するシステムとして、振動モータ・ピエゾアクチュエータを用いたTapTap⁵⁾、HugMe⁶⁾、SWORM⁷⁾などが提案されている。デバイスとして小型であることから、複数の振動モータ・ピエゾアクチュエータを組み合わせることで複雑な触覚刺激を与えることができる。また、空気圧アクチュエータを用いたHug over a distance⁸⁾、Huggy Pajama⁹⁾、Squeeze Me¹⁰⁾などのウェアラブルシステムも提案されている。空気圧アクチュエータの場合、ソフトな触覚刺激を与えられるという特徴がある。本研究でも、遠隔の触覚コミュニケーションを実現するために空気圧アクチュエータと非接触距離センサを搭載したウェアラブルシステムについて検討する。

2. システム構成

遠隔のハプティックコミュニケーションシステムは図1に示す距離計測・制御系（図1上部）と空気圧アクチュエータ系（図1下部）から構成する。距離計測・制御系は、非接触の距離センサ、マイクロコントローラ、制御ボードからなる電気系回路である。空気圧アクチュエータ系は吸排気エアポンプ、ソレノイドバルブ、ラバーバルーンからなるエアフロー回路である。膨張・収縮するラバーバルーンによりソフトな触覚刺激を生成することで、遠隔のハプティックコミュニケーションを実現する。

距離計測・制御系のマイクロコントローラは、接続された非接触距離センサからアナログ出力信号を読み取り、A/D変換した数値データから距離の推定値を計算する。PCは作成したプログラムをマイクロコントローラに転送し、マイクロコントローラ内部のデータをシリアル通信で取得するなど、システムの開発時に使用する。DCモータを内蔵したダイヤフラム式の吸排気エアポンプを動作させるために、一定の電流が必要になる。マイクロコントローラ単体では、吸排気エアポンプを動作させるために必要な電流を供給できないため、別電源をもつ制御ボードを介して吸排気エアポンプとソレノイドバルブを制御する。

ラバーバルーンを膨張させる場合、吸気エアポンプは外気を取り込み、ソレノイドバルブを通過してラバーバルーンに送る。このとき、ソレノイドバルブは吸気エアポンプから送られる空気のみを通過させ、排気エアポンプ側のエアフロー回路を遮断する。反対に、ラバーバルーンを収縮させる場合、排気エアポンプはラバーバルーン内の空気を吸引して排出する。このとき、ソレノイドバルブは吸気エアポンプから供給される空気を遮断し、排気エアポンプに送られる空気のみを通過させる。

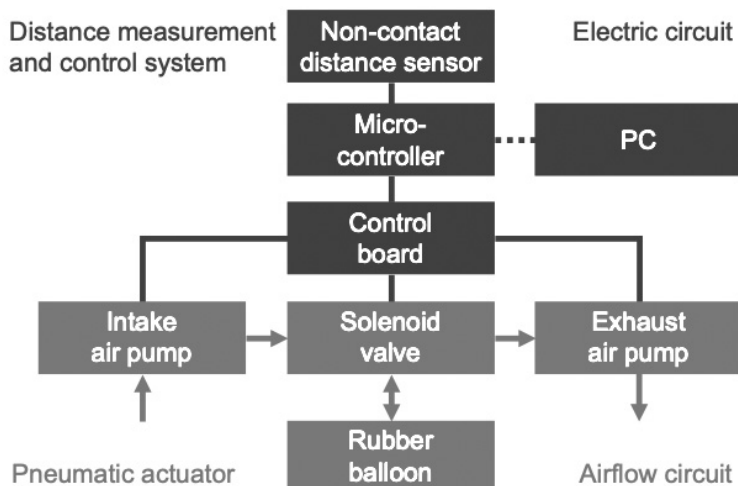


図1 遠隔ハプティックコミュニケーションシステムの構成

3. ハードウェア

3.1 非接触距離センサ

非接触距離センサにPSD (Position Sensitive Detector) 素子を用いた赤外線距離センサ SHARP GP2Y0A21YKを使用した。赤外線距離センサの外観を図2に示し、仕様を表1にまとめた。PSD素子には、高抵抗半導体基盤の片面に均一な抵抗層が形成されており、抵抗層の両端に信号取得用の電極がある。抵抗層は半導体のPN接合となっているため、光量に比例した電荷が光の入射位置に発生し、この電荷が電極までの距離に反比例した電流として取り出される。この赤外線距離センサを使用する場合、5[V]の電圧を印加して出力されるアナログ信号を取得する。



図2 赤外線距離センサ

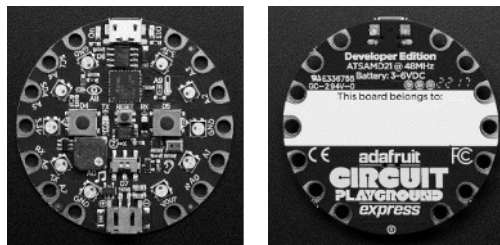
表1 赤外線距離センサの仕様

測定範囲	10-80[cm]
サイズ	29.5×13.0×13.5[mm]
動作電圧	4.5-5.5[V]
動作電流	30[mA]
赤外線波長	870±70[nm]

3.2 マイクロコントローラ

安価な小型シングルボードコンピュータとしてRaspberry Pi やArduino が市販されている。Raspberry PiはLinux系OSの動作する機能的には一般的なコンピュータであるのに対し、Arduinoは機能の限定されたマイクロコントローラである。動作速度やメモリサイズ等のハードウェア性能はRaspberry Pi が優れているが、ArduinoはA/Dコンバータを内蔵しているためアナログ出力のセンサとの接続、利用が簡便であるという特徴がある。

本研究では、図3に示す円形基盤のArduinoマイクロコントローラ (Adafruit Circuit Playground Express) を使用することにした。これらのハードウェア仕様を表2にまとめる。プロセッサには低消費電力のArm Cortex-M0系ATSAMD21E18を使用し、動作電圧5.0[V]、クロック周波数48[MHz]で動作する。5[V]の電源はMicro-B USB端子、または、JSTバッテリーコネクタから供給する。さらに、Adafruit Circuit Playground Expressには、オンボードのスピーカ、照度センサ、温度センサ、MEMSマイクロフォン、モーションセンサ、赤外線送受信ユニットも実装されており、様々な機能を利用できる。



(a) 前面

(b) 背面

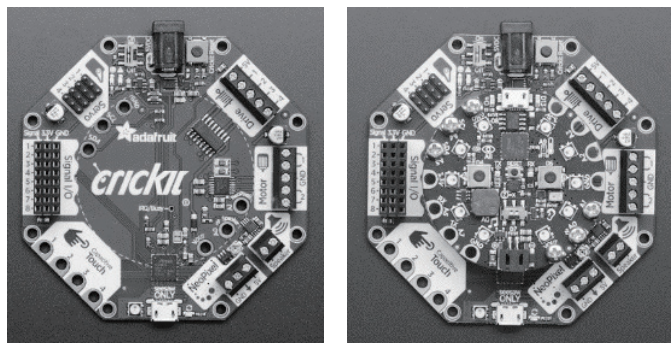
図3 マイクロコントローラ

表2 マイクロコントローラの仕様

プロセッサ	ATSAMD21	LED	NeoPixel LED×10
動作電圧	5V	スピーカ	金属振動板
動作クロック	48 MHz	照度センサ	Everlight ALS-PT19-3
プログラムメモリ	256 kB	温度センサ	Murata NCP15XH103F03RC
SRAM	32 kB	マイクロフォン	MEMSマイクロフォン
サイズ	φ50.6mm	モーションセンサ	LIS3DH 3-axis XYZ加速度計
重量	8.9g	赤外線送受信ユニット	

3.3 制御ボード

空気圧アクチュエータを構成する吸排気エアポンプのDCモータとソレノイドバルブを駆動するために、使用した制御ボード (Adafruit CRICKIT for Circuit Playground Express) を図4 (a) に示し、仕様を表2にまとめた。図4 (b) のように制御ボード上に、マイクロコントローラ Adafruit Circuit Playground Expressを重ねて固定することで、制御ボードとマイクロコントローラが接続される。マイクロコントローラを制御ボードに接続すると、マイクロコントローラ本体の入出力端子は無効になる。そのため、赤外線距離センサはデジタル・アナログ入力用Signal I/O端子に接続する。吸排気エアポンプをDCモータ制御用端子に接続し、ソレノイドバルブをアナログ・デジタルサーボ制御用端子に接続した。



(a) 制御ボード基盤 (b) マイクロコントローラ接続

図4 制御ボード

表2 制御ボードAdafruit Circuit Playground Expressの仕様

電源	5[V], 2-4[A]
アナログ・デジタルサーボ制御用端子 (16bitタイマ)	4
DCモータ制御用端子 (最大1A 8bit PWM速度制御)	2
ソレノイド・リレー・大型LED用端子	4
静電容量タッチセンサ端子	4
デジタル・アナログ入力用端子	8
NeoPixelドライバ出力端子	1
Dクラスアンプ出力端子 (最大3W 4-8Ωスピーカ用)	1
サイズ	85.0×81.0×14.7[mm]
重量	39.7[g]

3.4 吸排気エアポンプ

吸排気エアポンプには、図5に示すDCモータ駆動で流量 2.8[L/min]、最大負圧 55[kpa]のダイアフラムポンプ (ZR370-02PM) を使用した。このDCモータの定格電圧は4.5[V]、動作電圧は4.05-4.95[V]、電流は最大で500[mA]になる。吸排気エアポンプのサイズはφ27[mm]、突起部分を除く長さは58.2[mm]であり、突起部分に外径4[mm]、内径3[mm]のシリコンチューブを装着して使用する。

3.5 ソレノイドバルブ

吸排気エアポンプのエアフローを制御するために、図6(a)に示す3ポートのソレノイドバルブを使用した。ソレノイドバルブの定格電圧は6[V] 動作電圧は5-6[V]、電流220[mA]である。金属部分のサイズは12×14×18[mm]である。排気ポート、吸気ポート、シリンダポートから構成される3ポートソレノイドバルブの動作を図6(b)に示す。吸気時は、排気用ポートを閉じて吸気用ポートから取り込まれた空気をシリンダポートに送る。反対に、排気時は、吸気用ポートを閉じてシリンダポートから送られる空気を排気用ポートに送る。ソレノイドバルブに印加する電圧を変化させて可動コアを移動することで吸排気ポートを開閉する。

3.6 電源

エアポンプ1台の消費電力は2,250[mAh]であるため、吸排気エアポンプのペアで4,500[mAh]となる。市販されているニッケル水素電池の場合、容量はAAA(単4型)で800-1,100[mAh]、AA(単3型)で2,000-2,300[mAh]程度である。AAA(単4型)では供給する電流に余裕がないため、電源としてAA(単3型)ニッケル水素電池4本を格納する電源スイッチ付きバッテリーボックスを使用することにした。

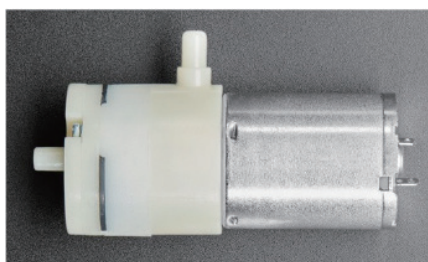
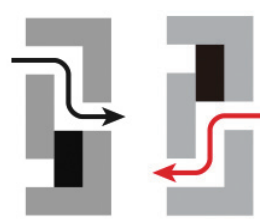


図5 吸排気ダイアフラムエアポンプ



(a) ソレノイドバルブ



(b) 吸排気の動作

図6 3ポートソレノイドバルブ

4. ソフトウェア

Arduinoのソフトウェア開発には統合開発環境 (Integrated Development Environment: IDE) を使用する。IDE上で、C/C++に類似したArduino言語によりプログラムを記述し、コンパイルして生成したバイナリファイルをUSB (Universal Serial Bus) の通信によりマイクロコントローラの記憶領域に書き込む。

赤外線距離センサの出力信号を読み取るためにloop関数内でArduino標準ライブラリに含まれるanalogRead()関数を呼び出す。analogRead()関数で取得した電圧は、10[bit]に量子化されるため0から1023(=2¹⁰-1)の整数値に変換される。ただし、制御ボード用ライブラリ(Adafruit seesaw Library)を使用する場合、analogRead()関数はAdafruit_seesawクラスを継承するAdafruit_Crickitクラスのオブジェクトに含まれるため、Adafruit_Crickitクラスのメソッドを呼び出すことになる。

吸排気エアポンプのモータも制御ボード用ライブラリに含まれるseesaw_Motorクラスを使用して制御する。seesaw_Motorクラスのthrottle()メソッドに引数に設定することで、吸排気エアポンプに内蔵されるDCモータの回転数を制御できる。引数は、モータの回転が停止状態ときに0、最大回転数のときに1を指定する。ラバーバルーンの内圧により、収縮時の排気に対して膨張時の吸気ではより大きな圧力で空気を送る必要がある。そのため、膨張・収縮速度のバランスがとれるように、吸気エアポンプに対して排気エアポンプのモータ回転数を小さく設定した。

3ポートソレノイドバルブも制御ボード用ライブラリのAdafruit_crickitクラスを使用して制御する。ソレノイドバルブを接続するアナログ・デジタルサーボ制御用端子は、一定電圧のパルス列の時間幅を変化させることで電圧を制御するPWM(Pulse Width Modulation)出力となっている。使用した制御ボードでは40-1,600[Hz]のPWM周波数を設定できる。PWM周波数を1,000[Hz]とし、Adafruit_crickitクラスのanalogWrite()メソッドの引数を0から65535(=2¹⁶-1)の範囲で指定してアナログ・デジタルサーボ制御用端子電圧を変化させる。3ポートソレノイドバルブに印加する電圧によって可動コアを制御して、吸排気用ポートを開閉する。

5. 赤外線距離センサによる距離計測

5.1 近似関数の最小2乗近似

図7(a)に距離の逆数と赤外線距離センサ出力電圧の関係を示す。距離が10[cm]=0.1[cm⁻¹]から100[cm]=0.01[cm⁻¹]の範囲で、距離の逆数と出力電圧の関係がほぼ線形であることが確認できる。したがって、物体との距離が10~100[cm]の範囲であれば、次式で物体との距離 x [m]の逆数 $1/x$ [m⁻¹]は、赤外線距離センサの出力電圧 E [V]により近似できる。

$$\frac{1}{x} = aE + \beta \quad (1)$$

$$x = \frac{1}{aE + \beta} \quad (2)$$

図7(b)にセンサと物体との距離が10-100[cm]のときの出力電圧を用いて、近似関数を求めた結果を示す。距離が85[cm]以上の領域で、実測値と近似関数の乖離は見られるが、85[cm]未満の領域ではほぼ一致していることがわかる。

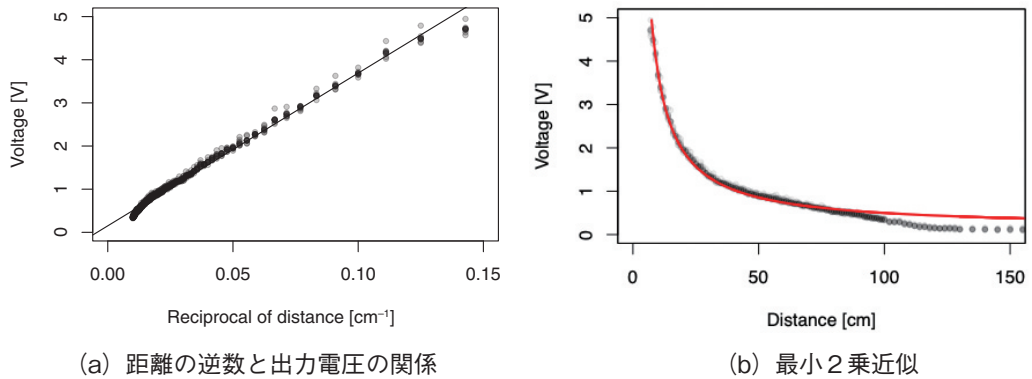


図7 赤外線距離センサの出力電圧と物体との距離の関係

5.2 反射率と測定精度の関係

赤外線距離センサでは物体に照射した赤外線の反射光を使用して距離を求めるため、反射率の低い物体では計測精度の低下が懸念される。そこで、図8に示す反射率の異なるファブリック素材を用いて測定精度を検証した。表3に測色計（Konika Minolta Chroma Meter CR-400）を用いて計測したCIE $L^*a^*b^*$ の値を示す。

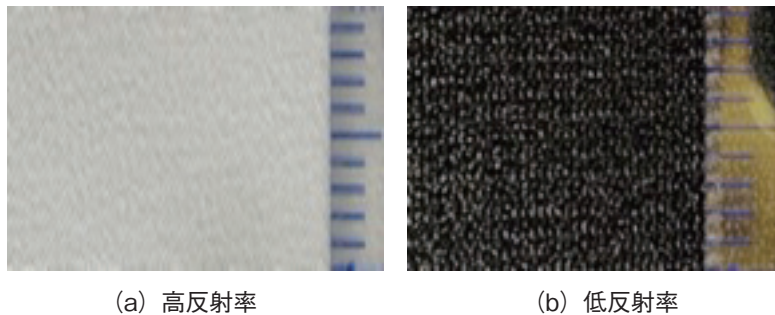


図8 反射率の異なるファブリック素材

表3 ファブリック素材の測色値

	L^*	a^*	b^*
高反射率	94.9	0.48	2.27
低反射率	12.8	1.92	2.11

反射率の異なるファブリック素材を用いて、赤外線距離センサの出力電圧を計測した結果を図9に示す。距離が50[cm]までは反射率の異なるファブリック素材でも差異は見られないが、50[cm]以上になると低反射率のファブリック素材では赤外線距離センサの出力電圧が低下している。したがって、低反射率の素材で距離計測する場合、距離が50[cm]以上になると実際の距離よりも大きく評価されることになる。赤外線距離センサを使用する場合、この特性に留意する必要がある。

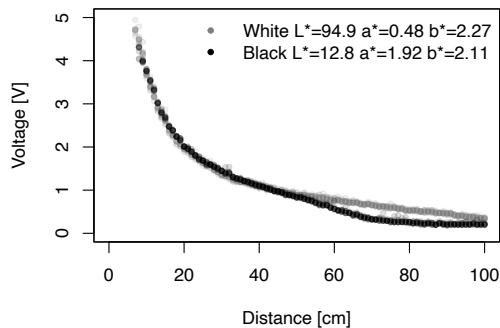


図9 反射率の異なるファブリック素材の計測

6. ウェアラブルソーシャルディスタンスキーパー

6.1 機能

遠隔のハプティックコミュニケーションシステムの実用例として、視覚的に確認の困難な後方のソーシャルディスタンスを維持するためのウェアラブルソーシャルディスタンスキーパーを開発した。ウェアラブルソーシャルディスタンスキーパーでは、後方に存在する人物や物体との距離を非接触で計測し、人物や物体との距離に応じて、空気圧アクチュエータによる触覚刺激を変化させて注意を促すという機能を実現する。具体的には、距離が大きい場合、長周期で空気圧アクチュエータを膨張・収縮させて安心感を与え、反対に距離が小さい場合、短周期で空気圧アクチュエータを膨張・収縮させて注意を喚起する。

6.2 デザイン

ファッションデザインは図10(a)に示す宇宙をテーマにキュートなデザインをコンセプトにした。配色はホワイトとブラックの2トーンにした。トップスは宇宙服を連想させるスタンドカラーのショートジャケットにし、ボトムスはハイウエストセミタイトスカートにした。ブラックの部分には合成皮革を用い、ホワイトの部分にはベルベット風起毛素材であるハイミロンを使用した。さらに、ベロア素材のワイドベルトとウエストポーチを合わせている。実際に制作したウェアラブルソーシャルディスタンスキーパーを図10(b)に示す。背面部の空気圧アクチュエータの膨張時と収縮時の様子を図10(c)に示す。

6.3 実装

遠隔の触覚コミュニケーションシステムを実装したウエストポーチ、赤外線距離センサ、空気圧アクチュエータを図11に示す。使用したマイクロコントローラ・制御基盤・バッテリーを衣服に直接装着することは、サイズと重量の制約から困難であったためウエストポーチに格納することにした。マイクロコントローラのオンボードLEDをシステムモニタおよび装飾に使用して、外部から見えるデザインにした。ウエストポーチは、マイクロコントローラの端子に合わせたゴールドのファス

ナーで開閉する。さらに、装飾としてフリンジを加え、ショルダーバッグとしても使用できるように止め具を追加した。

非接触式の赤外線距離センサは、取り外しもできるように背面の肩甲骨付近にスナップで固定した。センサ側のスナップは、センサ固定用のネジ穴を利用して生地と合わせて縫製した。

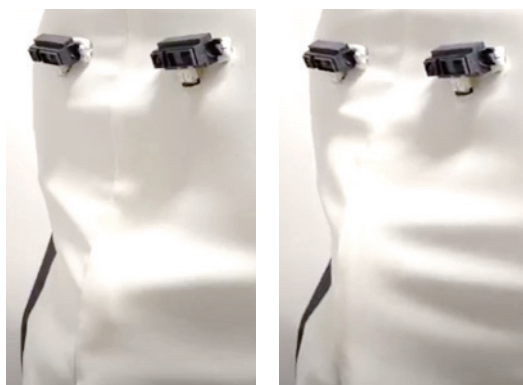
吸排気エアポンプは円筒系のソフトケースに格納し、スナップでウエストベルトの左右に固定した。ソレノイドバルブはウエストベルト背面中央にスナップで固定した。吸排気エアポンプ・ソレノイドバルブもスナップで固定しているため、取り外しが可能となっている。ラバーバルーンは背面のポケットに格納し、ラバーバルーン、ケーブル、シリコンチューブを背面の表地と裏地の間に挿入した。ジャケット背面ウエスト部分は、メンテナンス用にファスナーで表地・裏地を貼り合わせ、ラバーバルーンの交換を容易にした。



(a) デザインイラストレーション



(b) 制作したウェアブルシステム



(c) 空気圧アクチュエータの収縮・膨張

図10 ウェアラブルソーシャルディスタンスキーパー

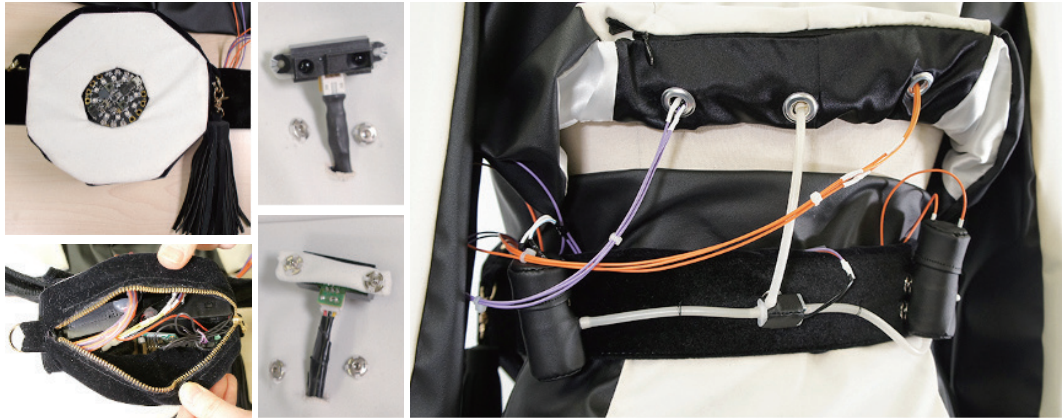


図11 システム実装（ウエストポーチ・赤外線距離センサ・空気圧アクチュエータ）

7. おわりに

本研究では、非接触距離計測系にと空気圧アクチュエータ系を組み合わせ、遠隔の触覚コミュニケーションを実現するシステムについて検討して、プロトタイプを開発した。次に、このシステムを、視覚的に確認の困難な後方のソーシャルディスタンスを維持するためのウェアラブルソーシャルディスタンスキーパーに応用した。ウェアラブルソーシャルディスタンスキーパーの空気圧アクチュエータは、背面の人物や物体との距離が大きい場合に低速で膨張・収縮して安心感を与え、反対に距離が小さい場合に高速で膨張・収縮して警戒を促す。システムの小型・軽量化、エアフロー出力の増強、外部環境認識の高度化が今後の課題として残されている。

謝辞

赤外線距離センサの測定精度検証にご協力いただいた共立女子大学家政学部 後藤 純子 教授、システムのプロトタイプ開発、ソーシャルディスタンスキーパーの制作にご協力いただいた共立女子大学家政学部 甲斐 咲帆 助手、共立女子大学大学院家政学研究科 安藤 美沙子 氏、元共立女子大学家政学部被服学科 高梨 佳惟 氏に深謝する。

参考・引用文献

- 1) Olsson, H., et al. (2002). Unmyelinated tactile afferents signal touch and project to insular cortex. *Nature Neuroscience*, 5 (9), 900-904.
- 2) Löken, L. S., Wessberg, J., McGlone, F., & Olsson, H. (2009). Coding of pleasant touch by unmyelinated afferents in humans. *Nature Neuroscience*, 12 (5), 547-548.
- 3) Conde-Agudelo, A., & Diaz-Rossello, J. L. (2016). Kangaroo mother care to reduce morbidity and mortality in low birthweight infants. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 8.
- 4) Vargas, M. F. (1986). *Louder than words: An introduction to nonverbal communication*. Iowa State Pr.
- 5) Bonanni, L., Vaucelle, C., Lieberman, J., & Zuckerman, O. (2006). Taptap: a haptic wearable for asynchronous distributed touch therapy. In *CHI'06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 580-585.

- 6) Cha, J., Eid, M., Rahal, L., & El Saddik, A. (2008). HugMe: An interpersonal haptic communication system. In *2008 IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games*, pp. 99-102.
- 7) Williams, M. A., Roseway, A., O'dowd, C., Czerwinski, M., & Morris, M. R. (2015). Swarm: an actuated wearable for mediating affect. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 293-300.
- 8) Mueller, F. F., Vetere, F., Gibbs, M. R., Kjeldskov, J., Pedell, S., & Howard, S. (2005). Hug over a distance. In *CHI'05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1673-1676.
- 9) Teh, J. K. S., Cheok, A. D., Peiris, R. L., Choi, Y., Thuong, V., & Lai, S. (2008, June). Huggy Pajama: a mobile parent and child hugging communication system. In *Proceedings of the 7th international Conference on Interaction Design and Children*, pp. 250-25).
- 10) Vaucelle, C., Bonanni, L., & Ishii, H. (2009, April). Design of haptic interfaces for therapy. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 467-470).

Smart Garment Creating New Clothing Function

– Development of Wearable Social Distancing Keeper –

Takao Furukawa

In addition to physical attributes including clothes, pitch, and tone of voice, haptic interaction such as a handshake or a hug plays a significant role in nonverbal communication. The COVID-19 pandemic requires us to maintain social distancing and avoid physical in order to prevent infection. This “new normal” may be a factor that inhibits smooth communication. This study describes the design of a system and fashion for a smart garment that realizes remote haptic communication to help the wearer maintain social distancing. A prototype system designed by assembling a pneumatic actuator and non-contact distance sensors was developed for remote haptic communication. This system was applied to a wearable social distancing keeper that notifies the wearer of the distance between them and another person at the back, which is visually difficult to check. In this wearable social distancing keeper, slow inflation and deflation of the pneumatic actuator gives a secure feeling when the distance between the wearer and the people behind them is long. In contrast, fast inflation and deflation of the pneumatic actuator alerts the wearer if the distance between them and the people behind them is short. Furthermore, the design methodology to integrate the costume and hardware devices was discussed from the aspect of fashion design.