事例紹介

BioTac —生体模倣型触覚センサ—

BioTac —Biomimetic Multi-modal Tactile Sensor—

Tomonori Yamamoto^{*1}, Nicholas Wettels^{*1*2}, Jeremy A. Fishel^{*1*2}, Chia-Hsien Lin^{*1*2}and Gerald E. Loeb^{*1*2}^{*1}SynTouch LLC ^{*2}University of Southern California

1. はじめに

人間は様々な様式の触覚フィードバックを通じて、巧みに手を動かすことができるが、現在の多くのロボットは、限られた触覚情報もしくはそれ自体の欠如により、ある特定の状況下以外では、器用な操作をすることが非常に困難である。手を用いた巧みな操作に触覚情報が不可欠であることは、末梢神経に障害のある被験者が、手を動かすことはできても、物体を安定把持することが困難なことから証明され得る [1]。また、対象物を継続的に安定把持するためには、滑り検出時の素早い反射反応による把持力調整が必要であり、それは脊髄から伝わる触覚情報に依存している [2]。現在のロボットテクノロジーでは、既知の物体の向き・大きさを視覚的に検知して、ロボットが安定的に物体を把持することは可能であるが、特定の条件下（対象物は剛体で壊れない等）に限られてしまう。筆者らは、人間のような触覚フィードバックをロボットに実装することで、人間型ロボットハンド、遠隔操作型ロボット、自律型ロボットなどの巧みな操作が可能になったり、ロボットを用いた定量的な診断（例えば、医療触診）が可能になると考えている。

これまでロボットテクノロジーが抱えていた問題の一つに、苛酷な環境下でも機能し得る頑強かつ高感度で、ロボットハンドの指に実用的に実装できるようなセンサがなかったことが挙げられる。そのため、これまでに、様々なアプローチによって触覚センサの開発が進められてきた。光学機器、コンデンサ、圧電素子、超音波、導電性ポリマーなどからの計測信号を変換することで、有用な触覚情報を得ることは可能であるが、特定のアプリケーションやある限定的な条件下に限られてしまう。また、これまで開発された触覚センサの多くは、人間の指のように複数の感覚情報を計測できるものより、一つの計測様式に特化されたものが多かった。さらに、計測・接続部分といったデリケート

図1 BioTac センサの写真。大きさは、一般成人男性の第二指の末節骨部と中節骨部を併せたサイズに相当する

な箇所が接触面に露出していることが多いため、耐久性の観点からも問題があった。触覚センサに関する解説記事は、文献 [3]~[5] などを参照されたい。

当社 SynTouch LLC では、これまでの触覚センサの問題点を踏まえ、人間の指と同等の大きさ・形状・コンプライアンスで、人間の指が感じ得る三つの触覚情報（力 [6]、振動 [7]、熱 [8]）を、人間の指と同等の計測範囲・感度で達成した生体模倣型触覚センサ BioTac[®]（図1）を開発・販売している。本稿では、BioTac の三つの感覚情報の計測方法、そして現在進行中のプロジェクトを紹介する。

2. テクノロジー

生体模倣型触覚センサ BioTac は、生体システムがどのように触覚情報を計測しているかという見識に基づき、設計・開発されている。図2に示されるように、BioTac のコア（核）はエラストマー性の人工皮膚で覆われており、その内部には非圧縮導電性の液体が注入されている。骨の役割を果たすコア、内部の液体、そして人工皮膚によって、人間の指と同等のコンプライアンスを達成している。各センサ（電極、圧力センサ、サーミスタ）の計測部はすべて内部に組み込まれているため、耐久性の高いデザインになっている。次に三つの計測情報を個別に見てみよう。

2.1 力情報の計測

BioTac センサが物体に接触すると、接触物体からの作用力によって、人工皮膚そして内部液体が変形する。コアには全部で 23 個の電極が配置されており、そのうちの 4

原 2012 年 2 月 29 日

キーワード: Haptics, Tactile, Multimodal, Biomimetic, Sensor

^{*1}2222 S. Figueroa St. PH2, Los Angeles, CA 90007, USA

^{*2}1042 Downey Way, Suite 140, Los Angeles, CA 90089, USA

図2 BioTac センサの概略図。内部に組み込まれた電極・圧力センサ・サーミスタを用いて、力・振動・熱情報を計測する。BioTac 内部に満たされた液体が、計測機能に大きな役割を果たしている

極に一定電圧を掛けているため、導電性の液体を介して残りの 19 極に電流が流れ込む。つまり、センサが物体に接触すると、内部の非圧縮性液体がシフトし、19 極で計測されるインピーダンス値が変化する。これらの信号値を元に、三次元の相互作用力ベクトル、物体との接触点、接触物体の曲面率などの値が推定可能になる [9]。計測された力情報は、異なる材質の表面特性や熱特性を計測する際にも役立つ。一例として、複数物体の熱特性を計測・比較する際の過渡現象の条件を揃える指針として、対象物との相互作用力や接触面積を一定に保つために力情報が用いられる。

2.2 振動情報の計測

人間は微小な滑りの検出が可能のため、物体を安定保持することができる。生体システムでは、60~500 [Hz] の周波数応答を持つパチニ小体 [10] が、このような中心周波数が 200 [Hz] でマイクロメートル単位の滑り検出を可能とする [11]。このような微細振動を計測するために、我々は液体の持つ効率的な伝搬特性と低周波数音波の長い波長（水中では、500 [Hz] で $\lambda = 3$ [m]）に着目し、接触点から離れた場所に圧力センサを配置した。これにより、BioTac で凹凸のある物体表面を撫でると、物体との接触によって生じた振動が内部液体を伝搬し、コア内に配置された圧力センサに到達する。この信号をバンドパス・フィルタを通して増幅することにより、振動情報が計測される。この機構によって、人工皮膚と対象物との滑り出し時の微細振動計測に成功している [7]。また、人工皮膚に人工的な指紋を刻むことにより、振動の振幅が大幅に増幅され、より微細な振動まで計測可能になっている。

2.3 熱情報の計測

温度の異なる物体同士が接触すると、それぞれの物体の形状と熱特性に基づいて、物体間で熱伝導が発生する。BioTac 内部の液体は、電子回路上に設置された小さなヒーターによって、およそ人間の体温程度に温められる。そのため、BioTac と物体が接触すると、人間が物体に触れた際と同様な熱伝導が起きる。BioTac の熱特性が既知であれば、温度変化情報から、対象物の熱特性が推定可能になる。また、

(a) Shadow Dexterous Hand (b) Motion Control Hand

図3 ロボットハンドや義手に実装された BioTac の一例。これらを用いて、様々なアプリケーションを開発中である

各電極で計測されるインピーダンスは、内部液体の温度に依存するため、サーミスタから計測された熱情報は、内部液体の温度特性補正にも使われている。

3. BioTac の応用例

当社では、2011 年秋より本格的に BioTac の販売を開始した。センサ本体と必要な接続機器が含まれた評価キットのほかに、ロボットハンド研究者に広く使われている Barrett-Hand (Barrett Technology, Inc.) や Shadow Dexterous Hand (Shadow Robot Company Ltd.) への商用ロボットハンド向けキットも取り揃えている。触覚センサの開発・販売のほかに、ロボットハンドや義手に BioTac を実装し、様々なアプリケーションへの応用にも取り組んでいる。参考例として、現在進行中の二つのプロジェクトを紹介する。

一つめは、ロボットハンドに実装された触覚センサからの情報のみに基づいた、未知物体の識別に関するプロジェクトである。人間が触覚を用いて能動的に物体を認識する際、物体の温度・固さ・触感・形状・容量・重さを推定するために、大別して六つの触覚探索操作を行うことが、過去の研究から報告されている [12]。BioTac は生体模倣型であるため、物体認識のアプローチも生体を模倣して、ロボットに六つの基本動作を行わせる。人間と同じような物体操作をさせるため、ロボットハンドには、人間の手と同等の 20 自由度を有した Shadow Dexterous Hand を採用し、その 5 指に BioTac を実装している (図 3(a))。ソフトウェアには、近年ロボット研究者のあいだで飛躍的に普及している Robot Operating System (ROS) を用いている。そのため、本プロジェクトで開発される触覚情報に基づいた物体識別アルゴリズムは、他のロボットハンドにも容易に応用できると期待される。

二つめのプロジェクトは、2008 年の当社創立時より主眼を置いている、義手を装着した被験者への触覚フィードバックである。本プロジェクトでは、(1) 滑りや相互作用力などの触覚情報を考慮した、反射的な把持力調整アルゴリズムの評価、(2) 意識的な知覚を促すための多様な触覚情報の

利点の探求, という2点に重きを置いている。BioTac は, これまでに二つの商用義手システムに実装されており, それらの義手システム用に開発された触覚ディスプレイを被験者の上肢に取り付けることで, 力・振動・熱情報を伝搬することに成功している (図3(b))。筆者らは, 本プロジェクトを通じて, 義手における個々の感覚情報の役割をより深く理解するとともに, 義手に要求される触覚情報計測の枠組みを明らかにできると考えている。

4. お わ り に

生体模倣型触覚センサ BioTac は, 生体システムの仕組みを理解し, それを模倣することで開発された。そして, 人間の指を介して感じ得る三つの触覚情報 (力・振動・熱) を, 人間の指と同じような機械的特徴を持ちつつ, ほぼ同等の計測範囲・感度を達成している。このような多様な触覚情報を計測できるセンサが, より多くのロボットに実装され, 義手やロボットハンドが, 人間の手と同レベルの巧みな操作ができるよう, 更なる開発・研究に取り組むたい。

謝 辞 BioTac の開発・商品化と本稿執筆に協力いただいた, Raymond Peck, Matt Borzage, Zoe Skontos, David Groves に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] J.C. Rothwell, M.M. Traub, B.L. Day, J.A. Obesko, P.K. Thomas and C.D. Marsden: "Manual Motor Performance in a Deafferented Man," *Brain*, vol.105, pp.515–542, 1982.
- [2] G. Westling and R.S. Johansson: "Factors Influencing the Force Control during Precision Grip," *Experimental Brain Research*, vol.53, no.2, pp.277–284, 1984.
- [3] R. Howe: "Tactile Sensing and Control of Robotic Manipulation," *Journal of Advanced Robotics*, vol.8, no.3, pp.245–261, 1994.
- [4] M.H. Lee and H.R. Nichols: "Tactile Sensing for Mechatronics—A State of the Art Survey," *Mechatronics*, vol.9, no.1, pp.1–31, 1999.
- [5] R.S. Dahiya, G. Metta, M. Valle and G. Sandini: "Tactile Sensing—From Humans to Humanoids," *IEEE Transactions on Robotics*, vol.26, no.1, pp.1–20, 2010.
- [6] N. Wettels, S. Member, L.M. Smith, V.J. Santos and G.E. Loeb: "Deformable Skin Design to Enhance Response of a Biomimetic Tactile Sensor," *IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp.132–137, 2008.
- [7] J.A. Fishel, V.J. Santos and G.E. Loeb: "A Robust Micro-Vibration Sensor for Biomimetic Fingertips," *IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp.659–663, 2008.
- [8] C.-H. Lin, T.W. Erickson, J.A. Fishel, N. Wettels and G.E. Loeb: "Signal Processing and Fabrication of a Biomimetic Tactile Sensor Array with Thermal, Force and Microvibration Modalities," *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.129–134, 2009.
- [9] N. Wettels and G.E. Loeb: "Haptic Feature Extraction from a Biomimetic Tactile Sensor: Force, Contact Location and Curvature," *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.2471–2478, 2011.
- [10] V.B. Mountcastle, R.H. LaMotte and G. Carli: "Detection Thresholds for Stimuli in Humans and Monkeys: Compari-

son with Threshold Events in Mechanoreceptive Afferent Nerve Fibers Innervating the Monkey Hand," *Journal of Neurophysiology*, vol.35, pp.122–136, 1972.

- [11] R.S. Johansson, U. Landstrom and R. Lundstrom: "Responses of Mechanoreceptive Afferent Units in Glabrous Skin of the Human Hand to Sinusoidal Skin Displacements," *Brain Research*, vol.244, no.1, pp.17–25, 1982.
- [12] S. Najarian, J. Dargahi and A. Mehrizi: *Artificial Tactile Sensing in Biomedical Engineering*. McGraw-Hill Professional, 2009.

山本智徳 (Tomonori Yamamoto)

2011 年ジョーンズ・ホプキンス大学機械工学科 Ph.D. 課程修了。同年 4 月より, 南カリフォルニア大学からのスピン・オフ企業 SynTouch LLC にて, ロボティクス・エンジニアとして, 触覚センサのロボットへの応用研究に携わる。遠隔操作型手術支援ロボットや人間—機械協調系などのハプティックデバイスの制御や, 動的システムのモデリングなどに従事。

Nicholas Wettels

Nicholas Wettels is a SynTouch co-founder and former PI on several projects including the DARPA project for autonomous object identification using tactile information. Nicholas received his Ph.D. in biomedical engineering from the University of Southern California (USC) in 2011 under a NASA GSRP Fellowship from Johnson Space Center.

Jeremy A. Fishel

Jeremy Fishel has worked on the development of the BioTac sensor since 2007 and co-founded SynTouch in 2008. Jeremy holds two masters degrees from the University of Southern California, one in Neuroengineering and the other in Computational Fluid and Solid Mechanics. He is currently pursuing a Ph.D. in Biomedical Engineering at USC.

Chia-Hsien Lin

Chia-Hsien Lin joined SynTouch in 2009 to develop the electronics and firmware for the BioTac. He has a double major in life science and chemistry as well as an electrical engineering background from the National Taiwan University. He is currently pursuing a Ph.D. in Biomedical Engineering at USC.

Gerald E. Loeb

Gerald Loeb, M.D. (Johns Hopkins University '72), is Chief Executive Officer of SynTouch LLC and Professor of Biomedical Engineering at the University of Southern California. He does basic research in sensorimotor neurophysiology and applied research in neural prosthetics and holds 54 issued US patents.