

スクリーニング用途を指向した表在感覚検査装置の開発

小山 善文^{1,*} 永田 正伸²

Development of Superficial Sensory Test Equipment for Screening Inspection

Yoshifumi Oyama^{1,*}, Masanobu Nagata²

The number of patients with sensory disorders such as cerebrovascular disorders and diabetes will increase in the future. In the medical field, sensory tests are performed for the purpose of diagnosing medical conditions and the degree of recovery. A device for performing tactile and temperature inspection devices has been developed. Tactile stimulation is an air jet non-contact method. In tactile stimulation experiments, stimulation pressures of 0.003 g, 0.016 g, 0.045 g, 0.086 g, and 0.124 g were obtained. For the temperature sensation stimulator, a stimulator with a temperature measurement function was prototyped.

キーワード：表在感覚、触覚刺激、温度覚刺激、空気噴流、温度覚プローブ、定量検査

Keywords : Superficial Sensory, Tactile Stimulus, Temperature Stimulus, Air Jet, Temperature Probe, Quantitative Inspection

1. 緒言

脳血管障害や糖尿病、脊椎障害など、感覚障害を伴う疾患患者数は、図1に示すように社会の高度化に伴い今後ますます増加する可能性が高い⁽¹⁾。感覚検査では、皮膚あるいは粘膜上で生じる表在感覚検査と、骨膜、筋肉、関節などで生じる深部感覚検査に分けられる。触覚、温度覚、圧覚、痛覚などは表在感覚、振動覚、運動覚は深部感覚となる。それぞれ異なる受容器で感知されその伝送路も異なる⁽²⁾。医療現場においては、これらの各体性感覚に対して、病状の診断や回復度合い、および、治療効果の確認などの目的で、感覚検査が実施されている。この病態の早期発見は障害の進行防止や患者の Quality of Life(QOL)の改善につながる。

代表的な検査診断法として、電気刺激を利用した抹消部分の感覚検査法がある⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、外来診療やリハビリテーションの現場では、診断の正確さよりも、段取りの簡易化、検査時間の短縮化、そして、被験者の負担軽減を重視した検査を行うのが現状である。検査する感覚の種類に応じて多種多様な器具が用いられ、例えば、触覚検査では、被験者が閉眼した状態で、柔らかな毛筆や脱脂綿、鳥の羽などで軽く触れ、被験者が感じた場合に“はい”と答えさせる。温度覚検査では、温水（40～50℃）と冷水（5～10℃）

を試験管に入れて検査部位に数秒間あて“温かい”か“冷たい”か、を答えさせる。振動覚検査では128Hzまたは256Hzの周波数で振動する音叉を被験者の軟部組織の少ない骨の部分にあて、振動を感じなくなったら“はい”と答えさせ、振動を感じなくなるまでの時間を調べる。これらの検査では、一般に検査部位と正常な部位との感覚の程度が比較される。このように従来の検査は、筆などの用具を活用しているのが現状で、検査者の体格や性別等で力加減が違うことや、一人の検査者でも常に同じ力加減にならないことは容易に想像が付き、検査基準に差が出てしまい定量的な検査とは言えない。

定量的感覚検査(Quantitative Sensory Testing:QST)装置については、これまでにいくつかの装置が提案されており、温度覚検査装置ではペンシル型温度感覚計（ユフ精機社）、振動覚検査装置では Vibration II (Sensortek 社)などが開発されている⁽⁵⁾。触覚検査では非接触体表刺激装置の研究事例が報告されている⁽⁶⁾。しかし、これまでに提案されている装置は単独の感覚検査用であり、複数の感覚検査を対象とした装置は筆者らの調査範囲では見当たらない。

筆者らは、表在感覚である触覚と温度覚、および、深部感覚の振動覚に着目し、最終的には1個のユニットでスクリーニング検査用途と指向した定量的検査が可能な携帯型感覚検査装置の開発を目指している⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

本稿では、表在感覚である触覚と温度覚の検査装置についての研究開発について報告する。温度覚検査装置の医療現場での臨床実験についての詳細は参考論文(8)に、振動覚検査技術については、参考論文(9)に詳細をまとめているので、本稿では割愛する。

¹ 企画運営部

〒861-1102 熊本県合志市須屋 2659-2

Board of Administration,

2659-2 Suya, Koshi-shi, Kumamoto, Japan 861-1102

² 拠点化プロジェクト系（地域協働プロジェクトセンター）

〒861-1102 熊本県合志市須屋 2659-2

Faculty of Project Centers (Center for Industry Collaboration Project),

2659-2 Suya, Koshi-shi, Kumamoto, Japan 861-1102

* Corresponding author:

E-mail address: oyama@kumamoto-nct.ac.jp (Y. OYAMA).

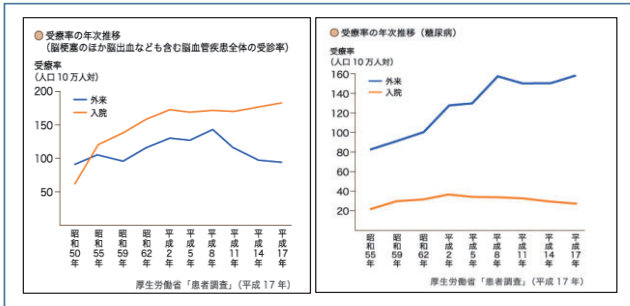


図1 脳梗塞、糖尿病における受療率の年次推移（日本生活習慣病予防協会：「生活習慣病」より抜粋）



図2 触覚刺激プローブ

2. 試作装置の概要

感覚刺激を行うための装置を試作した。一つのコントローラーを使用し、コントローラーに触覚刺激、温度覚刺激、振動覚刺激を発生するプローブをカートリッジ式で接続するタイプである。図2は触覚刺激プローブの概観、図3は温度覚刺激プローブの概観である。触覚刺激は空気噴流で行う方式⁽¹⁰⁾で、噴流空気を発生する小型ブロー（San Ace B52 山陽電気製）とノズルから成る。サイズは、長さ 150mm、φ30mm、重量 110g で、動作電圧は 12VDC。温度覚刺激は体表に接触して刺激を行う⁽¹¹⁾。プローブのサイズは、長さ 150mm、φ20mm で、熱源発生はペルチェ素子による。図4にコントローラーの概観と手の甲への刺激提示の様子を示す。コントローラーのサイズは、125×175×45mm、質量 350.5g で、H8/3052F マイコンを搭載している。



図3 温度覚刺激プローブ

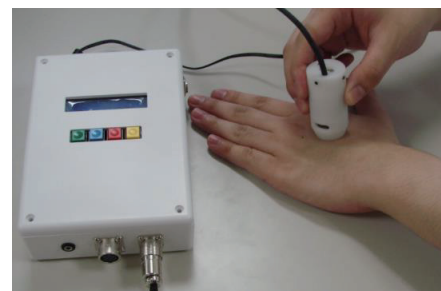


図4 コントローラーと刺激提示

3. 触覚刺激

3.1 従来の触覚検査法の問題点

触覚検査では、非常に微細な刺激を皮膚に提示することになる。リハビリテーション医療現場では、罹患状態のスクリーニング検査用として、市販の毛筆等を利用するのが通常である。熊本大学附属病院リハビリテーション部において、毛筆（サクラ画筆ネオセプロン14号平）を用いて、作業療法士等の医療従事者 21 人による触刺激力を調べた。その結果を図5に示す。手に持った筆を、電子天秤（SHIMADSU UX820S）に垂直に押し当てることを3回行った。結果、筆で刺激するときの圧力は個人間でのばらつきが大きく、最小 2g、最大 25g であった。1 個人でのばらつきも大きく、最大で 18g、最小で 3g の人もいた。このばらつきが、検査における信頼性を損なう要因になっている。この従来検査法の改善策として、空気噴流による触覚刺激法を採用した。空気噴流による触覚刺激法は、皮膚に接触しないため壊死や感染症の患部に対しても検査可能と考える。非接触表在刺激については、既に先行研究⁽⁵⁾がある。今回の提案法は、スクリーニング検査に特化した、微細な刺激圧を段階ごとに提示可能な非接触触覚刺激が特徴である。

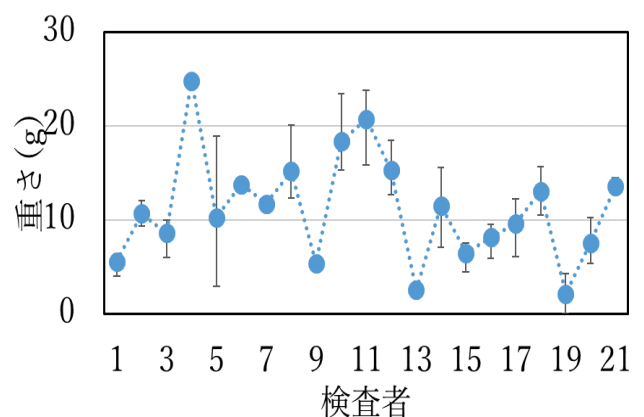


図5 医療従事者 21 人の筆圧の測定結果（熊大医学部附属病院リハビリテーション部）

3.2 空気噴流による触覚刺激触覚

刺激は、ブローアに供給する電圧で回転数を変えて噴流空気圧を5段階で調整する。周囲と同じ温度の噴流空気を被験者体表に当てると、皮膚表面の熱を飛ばしてしまい温冷覚を刺激してしまう。これを防ぐために、ノズル内部にニクロム線を配置しノズル内部の空気温度を上昇させ、体表温度より高めの温度の空気を噴射可能とした。図6に示すように、噴出口と検査対象面の間隔を10mmとし、吹出口径が3mmφのとき、噴流空気は27mmφの表面を刺激することを実験で確認した。これは、人間の触覚受容器の数が約30個/1cm²なので⁽¹²⁾、本装置は約140個の触覚受容器を刺激することになる。

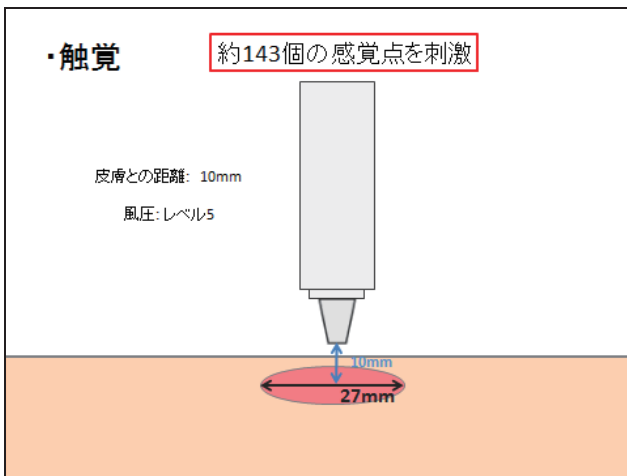


図6 触覚刺激のエリア

3.3 風圧測定実験

吹出口 3mmφ の触覚刺激プローブを電子天秤 (SHIMADSU UX820S) に垂直に固定して、電子天秤に当たる噴流空気の強さを計測した。吹出口から電子天秤面までの距離は10mm。ブローアの動作電圧が9Vのときをレベル5とし、0から9Vの電圧を均等に5分割している。結果を図7に示す。レベル1は0.003g、レベル2は0.016g、レベル3は0.045g、レベル4は0.086g、レベル5は0.124gであった。ブローア電圧を定格最大の12Vで動作したときは0.21gであった。さらに、吹出口を筆(サクラ画筆ネオセブロン14号平)と同様の形状(楕円10mm)にした場合は、0.02g、0.09g、0.18g、0.30gとなった(図8)。この結果を評価するために、医療現場の精密検査で使用されているモノフィラメント知覚テスター(図9)⁽¹³⁾の評価一覧(表1)と比較して評価した。モノフィラメント知覚テスターでは、ターゲットフォースが、0.008~0.07gで触覚正常、0.16~0.40gで触覚低下、0.60~2.0gで防御知覚低下、4.0~180gで防御知覚脱失、300gで測定不能とされる。本刺激プローブは、触覚正常と触覚低下の項をカバーし、検査部位に触覚異常の有無を判断するスクリーニング検査が可能である。

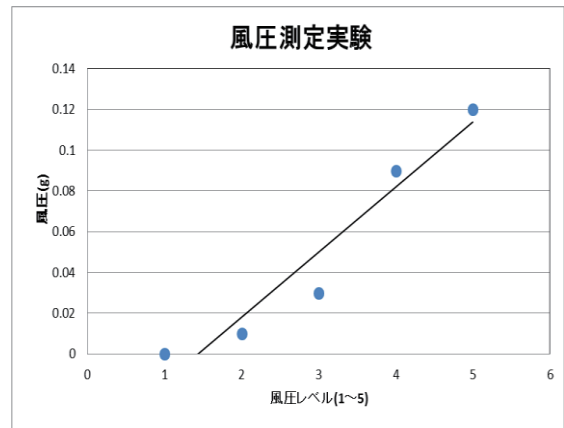


図7 触覚刺激プローブ風圧測定実験の結果

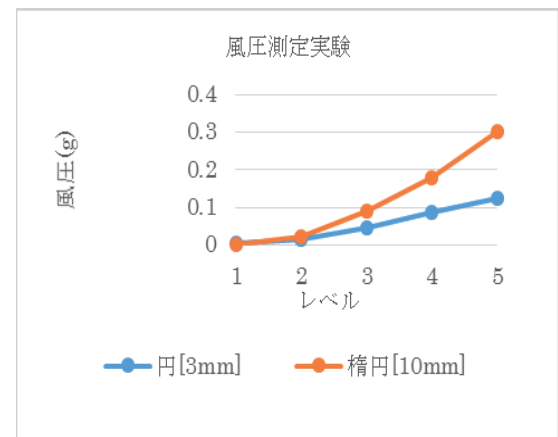


図8 風圧測定結果



図9 モノフィラメント知覚テスター

表1 モノフィラメント知覚テスター評価一覧

ターゲットフォース(g)	評価
0.008~0.07	触覚正常
0.16~0.40	触覚低下
0.60~2.0	防御知覚低下
4.0~180	防御知覚脱失
300	測定不能

3.4 体感実験

本プローブの触刺激が、人にどのように感じられるかを明らかにするために、触覚異常が無い健常学生 20 人を被験者に体感実験を実施した。計測部位は手の甲である。風圧の感じ方を、“感じない” から“強く感じる” の 5 段階とし口頭で回答してもらった。実験は 2 台の装置で実施した。図 10 に結果を示す。結果から感じ方に違いがあることがわかり、触覚刺激が正しく提示できると判断する。レベルにより感じ方に違いがあり、触覚刺激が正しく提示できているといえる。

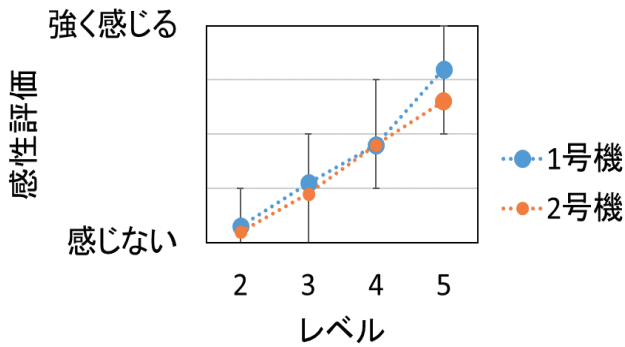


図 10 触覚刺激の体感実験結果

3.5 測定間隔一定化問題

本プローブは、検査者がプローブを手を持ち噴流空気を被験者に当てることを想定している。検査のたびにプローブと検査対象部位との間隔が一定に保たれないと、測定部位に当たる風力が一定とならず、定量的な検査結果が得られないことが予想される。この対策として、簡単な仕組みで一定間隔を保持可能な機能を装置に組み込むことを検討した。そのイメージ図を図 11 に示す。焦点距離 20mm の凸レンズと LED からなるモジュールをノズルに取り付けて、結像サイズの大きさが最小のとき、すなわち焦点が合ったときが、間隔 10mm とわかる仕組みである。間隔を変化させて結像サイズを計測したときの実験の様子を図 12 に示す。レンズからの間隔が 20mm のとき結像が最小となることが確認できた (図 13)。簡単な光学系をプローブに組み込むことで、問題は解決できる見通しを得た。

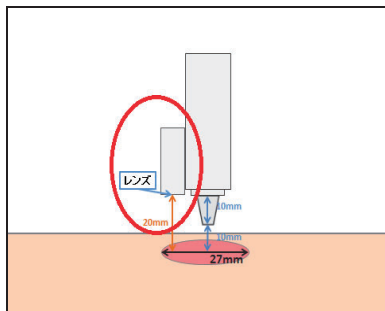


図 11 測距装置をプローブに装着したイメージ

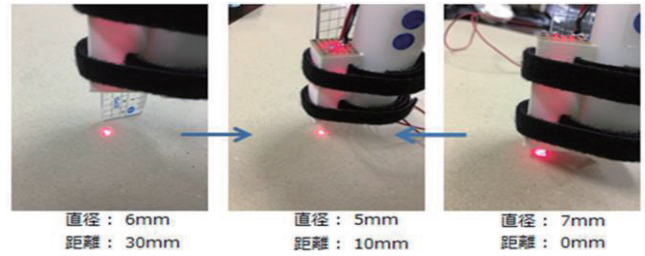


図 12 結像実験（焦点距離 20mm レンズ）

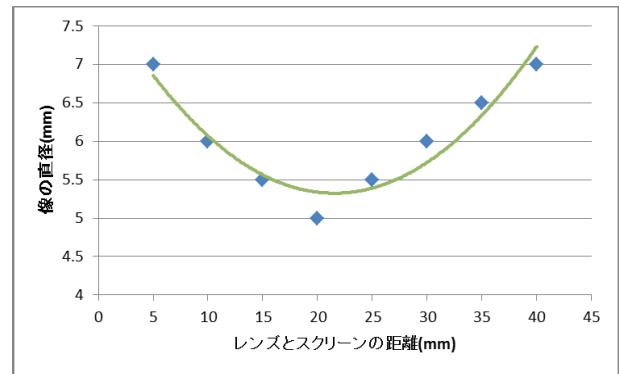


図 13 結像サイズ

4. 温度覚刺激

温度覚刺激装置の構成と構造を図 14 と図 15 に示す。ペルチェ素子に流す電流を制御して接触面の温度を可変する。温度センサで接触面温度を計測し、目標温度と計測温度を比較し、ペルチェ素子に流す電流の向きと大きさを制御する。ペルチェ素子は、表面を冷却する際に裏面が発熱するため、放熱用としてヒートシンクを接着する。接触面の大きさは 12mmφ である。温覚受容器は約 2 個/1cm²、冷覚受容器は約 15 個/1cm² なので⁽¹²⁾、温覚で約 3 個、冷覚で約 8 個の温度覚受容器を刺激することになる (図 16)。

この温度覚刺激装置は、温度覚刺激の機能の他に、検査部位の温度を測定可能な機能を持つ。温冷覚刺激プローブの温度センサを利用して皮膚温度を測定する。この機能は、別の温度計を用いなくて済むので段取りの手間が省ける。検査部位の温度を測定することで、検査部位より高い温度または低い温度を被験者に提示する閾値検査が可能となる。また、第 3 章に記載した触覚検査において、刺激プローブからの噴流空気を被験者に提示するとき、あらかじめ検査部位の温度がわかれば、温度覚を刺激することなく触覚受容器だけを刺激可能となる。

4.1 温度覚刺激実験

温度覚刺激プローブを 5℃ から 45℃ の範囲で 10℃ ごとに変化させ、被験者に温度提示を行い、どのように感じるか

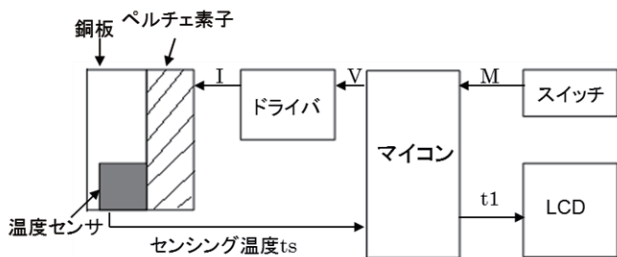


図 14 温度覚刺激装置構成

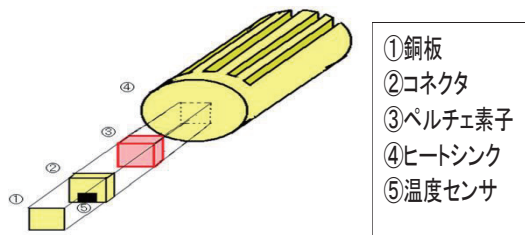


図 15 温度覚プローブ

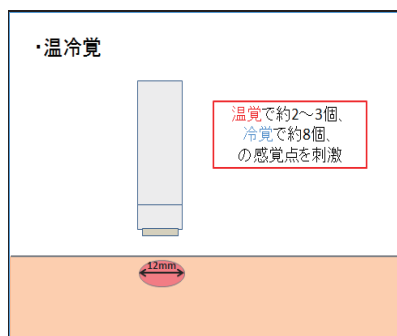


図 16 温度覚刺激エリア

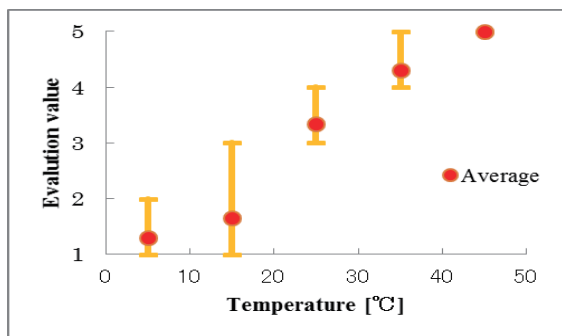


図 17 温度覚刺激プローブ体感実験結果

の実験を行った。被験者は 23 人の健常学生である。検査部位は被験者の利き手の甲である。評価基準は 5 段階評価で 1 を「冷たい」とし、順に「ひんやり」、「何も感じない」、「温い」、「暑い」とする。被験者に対する評価実験結果を図 17 に示す。縦軸は全被験者の評価の平均値、横軸は設定温度で、温度が上昇するに従い評価の平均値が上がっていて、45°C で全員が熱いと感じた。体温より低い 15°C は、冷たさに鈍感になり、5°C と変わらずに十分に冷たいと感じる場合がある。

4.2 温度測定

あらかじめ、設定温度が明示できる可変温度熱源を用意し、温度覚プローブをこの熱源に接触したときの温度センサの遷移温度から、温度覚プローブの温度測定機能の検定式を作成した⁽¹¹⁾。作成した温度測定機能を用いて、人の表在温度の測定実験を行った。被験者は 32 人の健常学生である。被験者の左右どちらかの手の甲の温度を、デジタル温度計(安立計器 HD-1200K)と本装置で測定し、その誤差を調べた。結果を図 18 に示す。誤差は、最大±0.8°C であった。この結果は、閾値検査が可能な精度と言える。

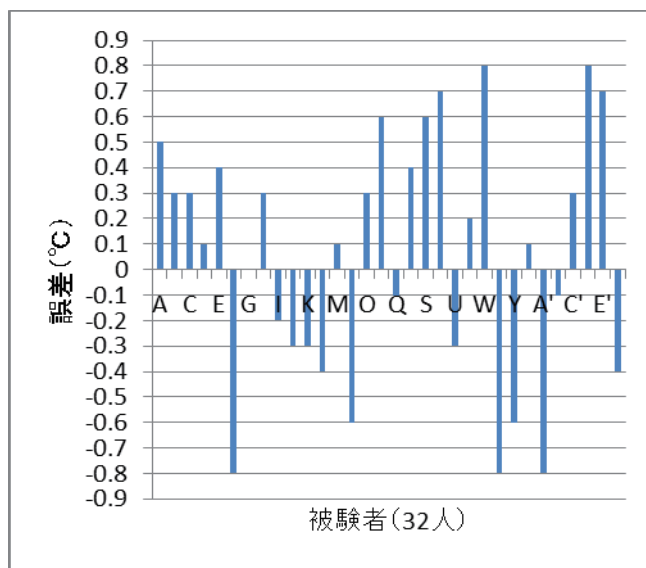


図 18 本機能の測定結果と温度計の測定結果との誤差

5. 結言

触覚検査における定量的触覚刺激を、噴流空気をを用いて非接触で行う触覚刺激プローブを提案し、スクリーニング検査を行う触覚異常の有無検査を行えることを、試作した装置を使い実験により明らかにした。定量的刺激が発生できるように、触覚刺激プローブと測定部位との間隔を一定に保つ機能を検討し、装置に組み込める見通しを得た。温度覚刺激装置では、温度測定機能を持つ刺激装置を試作し、

実験の結果、スクリーニング検査用途として使える見通しを得た。試作した装置の機能を用いて、診療機関で臨床実験を行うことが今後の課題である。

今回報告した触覚検査技術と温度覚検査技術、そして、既に発表している振動覚検査技術を組み合わせた複合型感覚検査装置を、医療現場の要求仕様に合わせて製品化開発し、医療現場の検査環境が改善されることに寄与できれば幸いである。

謝辞

本研究を進めるにあたり、医療の専門的立場からご助言および実験等で協力いただいた熊本大学附属病院リハビリテーション部大串幹准教授（当時）、萩野光香作業療法士に感謝致します。

本研究を進めるにあたり、実験等で協力していただいた多くの本校小山研究室の卒業生に感謝いたします。

本研究は、JSPS 科研費 JP15K01348 の助成を受けたものである。

（令和元年 9 月 25 日受付）

（令和元年 12 月 5 日受理）

参考文献

- (1) 一般社団法人日本生活習慣病予防協会：「生活習慣病」，<http://www.seikatsusyukanbyo.com/> (2018.9.30 閲覧)
- (2) 岩村：「皮膚表在感覚」、電子情報通信学会「知識データベース」 | 電子情報通信学会 2010, S3 群-2 編-3 章, Ver.1, pp.2-10 (2010).
- (3) Matsutomo R, Takebayashi K, Aso Y : “Assessment of peripheral neuropathy using measurement of the current perception threshold with the neurometer in patients with type 2 diabetes mellitus”, J Int Med Res, 33(4), pp.442-453 (2005).
- (4) Masson EA, Veves A, Fernando D, Boulton AJ : “Current perception thresholds, a new, quick, and reproducible method for the assessment of peripheral neuropathy in diabetes mellitus”, Diabetologia 33(4), 32(10), pp.724-728 (1989).
- (5) 大西, 八幡, 山本, 村井, 池田 : 「3つの機種(Vibration II TM-31A SMV-5)による振動覚弁別閾値認識の比較」、産業医科大学雑誌, No.16, pp.61-70 (1994).
- (6) 瀬野, 小暮, 渡辺, 加藤, 小林, 嶋津 : 「非接触体表圧刺激による知覚閾値評価システムの開発および評価」、生体医工学, 53(6), pp.303-310 (2015).
- (7) 小山, 永田, 大串, 萩野 : 「診療機関における定量的感覚検査のための複合型感覚検査装置開発」、産業応用工学会誌, Vol. 3, No. 2 pp.34-41 (2015).
- (8) 大串, 西, 萩野, 中村, 水田, 濱崎, 小山, 永田 : 「定量的感覚検査のための複合感覚提示器の開発」、日本整形外科学会誌, Vol.87, No.8, S1443 (2013).
- (9) 永田, 小山 : 「感覚検査における深部感覚検査用刺激発

生技術の研究」, 熊本高等専門学校研究紀要, 第 10 号 (2018).

- (10) 本田, 小山 : 「定量的感覚検査(QST)のための触覚刺激装置の開発研究」, 平成 27 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 15-2P-04 (2015).
- (11) 小山, 永田, 大串, 萩野, 本田 : 「定量的感覚検査のための温度覚刺激プローブ開発研究 - 体表在温度測定機能付き刺激プローブ - 」, 信学技報 MBE2014-107, Vol. 114, No. 408, pp. 71-76 (2015).
- (12) 片野, 内田 : 「皮膚感覚 | 感覚 | 看護 roo! [カンゴルー]」, <https://www.kango-roo.com/sn/k/view/2411> (2018.9.30 閲覧)
- (13) 酒井医療株式会社 : 「知覚検査」, <https://www.sakaimed.co.jp/knowledge/hand-therapy/evaluation/evaluation02/> (2018.9.30 閲覧)