



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	An Evaluation of a Displacement Estimation Method by an Iteration Method for a Four Degrees of Freedom Capacitive Force Sensor [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	村上, 知里
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第11302号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55550
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Chisato_Murakami_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（情報科学） 氏名 村上 知里

学 位 論 文 題 名

An Evaluation of a Displacement Estimation Method by an Iteration Method for a Four Degrees of Freedom Capacitive Force Sensor

（静電型 4 自由度力センサのための反復法による変位推定の評価）

日本における 65 歳以上の高齢者人口の割合は拡大を続けており、高齢者疾患の一つとして褥瘡が挙げられる。褥瘡とは虚血性の壊死であり、発症の機械的要因は生体にかかる力であることが知られている。しかし、その発症機序は解明されていない。生体の皮膚表面にかかる力は、垂直力 F_Z 、せん断力 F_X, F_Y 、これらの方向を軸とした回転力 T_Z, T_X, T_Y の 6 自由度の力である。これまで、褥瘡の発症には垂直力に相当する圧とせん断力に相当するずれ力が影響するとされ、圧およびずれ力の分散や減少のため、自発運動が困難な患者への体位変換や褥瘡予防具の使用が行われてきた。これらの力に加え、以前から回転力 T_Z の関与も指摘されていたが、生体に適用可能なセンサがないため、定量的な評価は行われていない。近年、この回転力 T_Z の発生を抑制するクッションやマットレスが開発され、このような褥瘡予防具の効果を示すためにも、新たな力センサが必要である。

そこで、我々の褥瘡予防研究チームでは、 F_X, F_Y, F_Z, T_Z を同時計測可能な 4 自由度静電型力センサの開発を行っている。本センサは生体用センサの必要条件である薄型・柔軟性を有している。また、その検出過程から、センサに加わる 4 自由度の変位（せん断方向 X, Y 、垂直方向 Z 、回転方向 θ_Z ）および力（ F_X, F_Y, F_Z, T_Z ）を検出することが可能である。センサは 16 組の平行平板型コンデンサを持ち、各コンデンサにおいて計測される静電容量から変位および力を算出する。褥瘡好発部位の大きさから、2 種類のセンサ（10 mm 角センサ（約 10 mm×10 mm×5.0 mm）、20 mm 角センサ（約 20 mm×20 mm×5.0 mm））が作製された。推定は、静電容量 16 値から変位 4 成分を推定する変位推定、変位 4 成分から力 4 成分を計算する力推定の 2 段階で実行される。しかし、変位推定において使用する変位-静電容量特性は非線形性と非単調性を持つコンデンサが存在するため、解析的に任意の変位を求めることは困難である。そこで、反復法による変位推定法を開発し、その推定精度の評価を行った。開発された反復法は、非線形入出力特性としての変位-静電容量特性を高次多項式でモデル化することにより、非線形誤差に対処している。

本論文では、次の 2 つの検討を目的とした。一つ目に、作製したセンサの静電容量を計測し、再現性の検討を行った。二つ目に、20 mm 角センサの計測静電容量を入力値として変位推定を行い、推定精度の評価を行った。

反復法は、各コンデンサ i における計測静電容量 y_i と変位-静電容量特性のモデル関数値 $f_i(x_1, x_2, x_3, x_4)$ との残差 $R_i = f_i - y_i$ の最小化問題として設定された。モデル関数は高次多項式で表現され、その値は 4 自由度の変位 x_1, x_2, x_3, x_4 により決定する。 x_1 は反復回数 t における推定成分であり、4 自由度の変位 X, Y, Z, θ_Z が順に担当する。また、 x_2, x_3, x_4 は x_1 以外の変位が担当し、 t までに推定された変位値が採用される。 $R = 0$ において、 x_2, x_3, x_4 の代入により推定変位 x_1 が決定される。この x_1 を f_i に代入することで、 t におけるモデル関数値が得られる。反復回数 $t + 1$ における推定成分 x_1 は、校正時に取得された探索表との一致度数により、現時点において不足している変位が

選択される。各反復において、モデル関数 $f_i(x_1, x_2, x_3, x_4)$ の x_2, x_3, x_4 が更新され、 x_1 を計算するための高次多項式のパラメータが最適化されることになる。コンデンサ i が $1 \sim m$ の値をとり、多項式の次数を n とすると、この問題は、 m 元 n 次連立方程式の最小化問題に帰着する。このアルゴリズムは MATLAB により実現された。

センサは誘電体としてのシリコーンジェル (10 mm 角センサ (10 mm×10 mm×5.0 mm), 20 mm 角センサ (20 mm×20 mm×5.0 mm)) と 2 枚のフレキシブル基板で作製された。シリコーンジェルの比誘電率は 4.8 とした。電極は各フレキシブル基板上に 4 個ずつ配置され、1 個の電極は 10 mm 角センサにおいて 3.5 mm×3.5 mm, 20 mm 角センサにおいて 7.0 mm×7.0 mm の大きさを持つ。計測システムは LCR メータ (國洋電機工業, KC-557), XYZ $\alpha\beta$ 軸ステージ (シグマ光機, TSD-40EC), 万能試験装置 (オリエンテック, TENSILON RTE-1210) で構成された。センサに対し XYZ $\alpha\beta$ 軸ステージで変位を与えた際の 16 組のコンデンサにおける静電容量値を LCR メータで計測した。計測条件は印加電圧 AC1V, 計測周波数 100 kHz であった。1 点の計測時間は 896 ms であり、各変位条件に対し 3 回の計測が行われた。また、変位推定法の精度評価では、平行平板コンデンサにおける理論値と計測値に対して推定が実行された。

10 mm 角センサの 16 組のコンデンサにおける平均変動係数は約 3.23% であり、この変動率は十分に小さく、センサとしての実用に耐えうると判断した。ただし、2 枚の電極基板の各電極から引き出されている電極ラインが干渉し、寄生容量が確認された。この影響は再現性を持っていたが、変位-静電容量特性の形状として非単調であった。20 mm 角センサの計測では、この影響の対策として、2 枚の電極基板の電極ライン間の絶縁処理を強化した。また、組み立て時における 2 枚の電極基板の位置ずれのために、変位-静電容量特性の形状は理論特性と異なる変化を示した。この位置ずれ防止のために、今後、組み立て方法の改善が必要である。一方、変位推定ではセンサの変位フルスケール値に対する最大フルスケール誤差は、理論値において約 4.9%, 計測値において約 22% であった。この最大誤差は零変位の推定で見られ、これは探索表に零変位周辺の情報が不足していることに起因していると考えた。零変位周辺の検出規則を新たに定めることで、この誤差をさらに改善できることが予想される。