

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：34412

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760217

研究課題名(和文)粘弾性チューブ内での超音波伝播を利用する安全確認型広範囲接触センサの開発

研究課題名(英文)Development of Safety monitoring contact sensor using propagation of ultrasonic wave in viscoelastic tube

研究代表者

鄭 聖熹 (Jeong, Seonghee)

大阪電気通信大学・工学部・准教授

研究者番号：50422176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、粘弾性チューブとその中を伝搬する超音波信号を用いて、広範囲での確実な接触検出が可能なやわらかい接触センサシステムの開発を目指した基礎研究を実施した。直線及び曲線形状を有するチューブ内の超音波伝搬特性(伝搬時間及び音圧の減衰)を実験的に明らかにし、任意形状のチューブでも自己診断用のモニタリング信号が生成できる手法を提案した。また、超音波の推測伝搬時間情報をベースに、故障を含むセンサシステムの異常が検出できる自己診断アルゴリズムを開発し、その有効性を実験的に確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we conducted a fundamental research to develop a flexible contact sensor system capable of reliable detection performance over a wide-range area, which uses a viscoelastic tube and an ultrasonic signal propagating through it. We revealed the propagation characteristics of the ultrasonic signal in a straight and curved tube, and proposed a method that produces monitoring signals used in a self-diagnosis circuit for a voluntary tube shape. A self-diagnosis algorithm that can detect an abnormal state of the sensor system including sensor failures has developed and confirmed its validity experimentally.

研究分野：ロボット工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学/機械システム

キーワード：Safety contact sensor ultrasonic wave flexible contact sensor

1. 研究開始当初の背景

人とロボットの共存・協働において両者間の接触は避けられないことである。それ故、接触による人の傷害可能性を最小限に留めるための「安全な接触」が保証されなければならない。そのためには、接触をロボット本体の広範囲で検出でき、検出不能又は検出失敗時の挙動が必ず安全側である安全性の高い接触センサシステムが要求される。しかし、これまで提案された分布型センサは、接触検出原理上、接触を検知して危険を伝達する危険検出型であり、故障時誤って安全を伝達する安全性の問題を抱えていた。

2. 研究の目的

高い安全性を有する接触センサは、危険を検出して安全を伝達するのではなく、安全を検出して安全を伝達する「安全確認型」でシステムを構成することで実現できる。そこで、本申請研究では、粘弾性チューブ内を伝播する超音波エネルギー情報を用いて広範囲接触検知が「安全確認型」で実現できる、「フェールセーフな広範囲接触検知センサシステム」の開発を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 粘弾性チューブ内を伝播する音波は、内壁の振動による速度分散と吸収で、伝播速度の低下及びエネルギー損失が発生し、その特性は周波数にも影響されることが知られている。まず、開発する接触センサで用いる超音波(40[kHz])が、異なる硬さのチューブ内を伝播する際の速度及び減衰特性をまず実験により明らかにする。

(2) 音波のエネルギー損失は、チューブ形状によっても影響されるため、チューブの曲げ形状の直線形状に対する伝播音圧損失率及び伝播時間遅延率を実験的に調べる。その後、同実験結果を基に曲率経路を考慮した超音波の音圧損失率及び伝播時間遅延率の推定式を導出し、モニタリング信号生成用の適切音圧閾値の選定手法を確立する。

(3) 提案システムでは、検出機能のフェールセーフ性が重要である。そこで、超音波信号を周期的に発信し、モニタリング信号監視による異常検出が可能なる自己診断アルゴリズムを開発し、実験により検証する。

4. 研究成果

(1) チューブ内超音波の伝播速度を表わすために、計測したチューブ内音速 C [m/s] を空気中の音速 C_0 [m/s] で正規化した音速比 C/C_0 を求めた。チューブ内音速 C は、チューブ長さ 1.5[m] と 2[m]、2[m] と 2.5[m] における超音波信号の検出初期時間差を用いて求めた。各チューブ厚さの音速比の平均値及び標準偏差を図 1 に示す。同図から、各チューブに

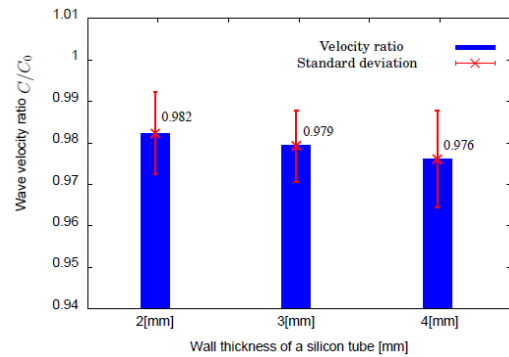


図 1

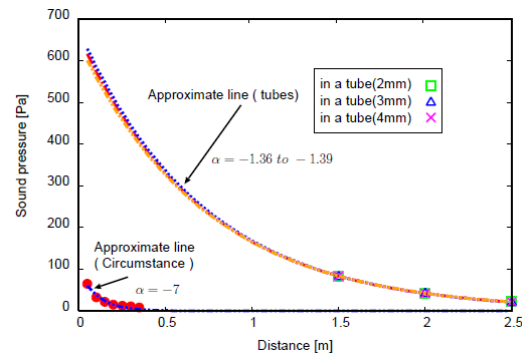


図 2

おける平均音速比が厚さ 2[mm]、3[mm]、4[mm] においてそれぞれ 0.982、0.979、0.976 であり、チューブ内伝播速度が空気中の音速よりも遅いことが確認できた。しかし、各チューブの厚さによる伝播速度変化に有意な差は確認できなかった。次に、チューブ内を伝播する超音波の伝播距離に対する減衰近似曲線及び自由音場内の超音波の減衰近似曲線を図 2 に示す。同図より、各チューブ厚さに関しては、超音波減衰係数間に大きな差は見られなかった。一方、チューブ内超音波の減衰は自由音場内の超音波の減衰より遙かに小さいことが確認された。これは、チューブ内の超音波が空気中よりも平面波に近い形で伝播しているのが理由として考えられる。結果的に、本実験を通して、ある程度広い範囲のチューブ硬さが選択でき、本手法で長距離のセンシングが可能であることが確認できた。

(2) チューブ曲率による超音波の伝播遅延時間特性を調べるために、まず、単位巻き長さにおける伝播時間遅延率を求めた。伝播時間遅延率は、直線形状時に対する曲線形状時の単位巻き長さ当たり伝播遅延時間の比を表す。各曲げ直径において、伝播遅延率と各チューブ巻き長さを線形近似した時の傾きを伝播時間遅延率係数とした場合、直径 75[mm] では 1.89[%/m]、直径 113[mm] では 1.14[%/m]、直径 168[mm] は 0.63[%/m]、直径 390[mm] においては 0.17[%/m] と求めた。

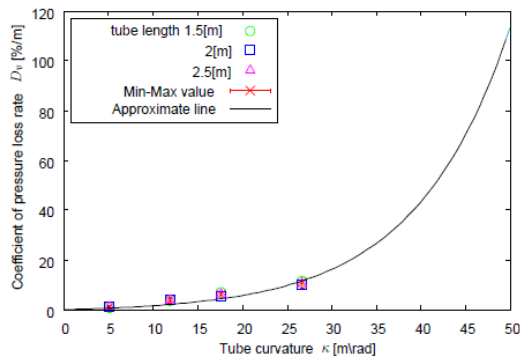


図 3

各チューブ曲げ直径を曲率に変換し、それに対応した伝搬時間遅延率係数をプロットしたグラフを図3に示す。同図において、同係数がチューブ曲率変化に対して指数関数的に増加していることが分かる。これは、チューブ曲率が大きくなれば、単位長さあたりのチューブ壁に衝突する超音波の断面積が大きくなり、その分内壁での速度分散が大きくなるのが原因であると考えられる。図3の各測定点を指数関数で近似した推定式を用いることで、任意の曲率を有するチューブにおける巻き遅延率係数を推定することができる。今回実験で用いたシリコンチューブでは、曲率遅延率近似係数は0.045[%]である。

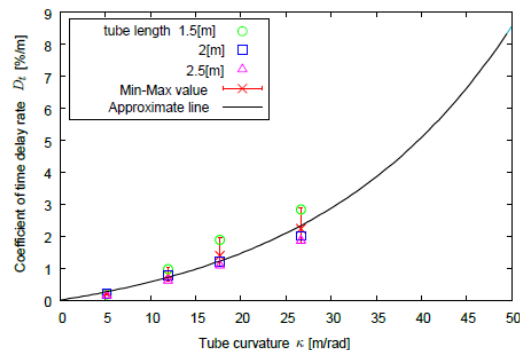


図 4

次に、チューブ曲率による超音波の音圧損失特性を調べるため、単位巻き長さにおける音圧損失率を求める。ここでは、伝搬音圧に比例した電圧が超音波受信器から検出されることから、ピーク電圧値を音圧の最大値として捉えて音圧損失率を求める。音圧損失率は、直線形状時に対する曲線形状時の単位巻き長さ当たり音圧損失の比を表す。各曲げ直径において、音圧損失率とチューブ巻き長さを線形近似した時の傾きを音圧損失率係数とした場合、直径75[mm]では11.53[%/m]、直径113[mm]では6.79[%/m]、直径168[mm]は4.41[%/m]、直径390[mm]においては1.63[%/m]と求めた。これは、巻き損失率係数も巻き遅延率係数と同様に曲げ直径に強く影響され、曲げ直径が小さい程同係数が大きくなることを示している。各チューブ曲げ直径を曲率に変換し、それに対応した巻き損失率係数をプロットしたグラフを図6に示す。同図において、巻き損失率係数は曲率の増加に伴い指数関数的に増加することが分

かる。図6の各測定点を指数関数で近似した推定式を用いることで任意のチューブ曲率を有する巻き損失率係数を推定することができる。今回の実験で用いたシリコンチューブの場合、曲率損失率係数は0.095[%]であった。

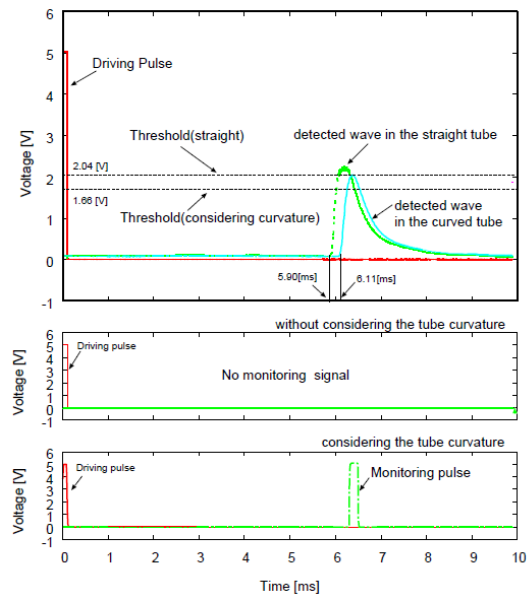


図 5

図5にチューブ曲率を考慮したモニタリング信号生成用電圧閾値の妥当性検証実験の結果を示す。同図において、直線形状時の波形から受信信号有無の判断閾値としては、ピーク電圧の95[%]に相当する2.04[V]、曲線形状時の95[%]に相当する判断閾値は、1.66[V]が適切と考える。従って、図(中)に示すように、同じ長さのチューブであるが直線形状時の閾値を曲線形状に適用した場合には、モニタリング信号が正常に生成できない。一方、曲線形状時の推定音圧損失率18.46[%]を考慮して閾値を求めると、1.66[V]となり、図(下)に示すようにモニタリング信号が正常に生成できていることが確認できる。

(3) 本研究で提案するセンサシステムにおいては、検出機能のフェールセーフ性が重要である。そこで、自己診断信号により超音波信号を周期的に発信し、生成されたモニタリング信号の検出時間を計測してシステムの異常検知を行う手法を提案する。

提案手法のアルゴリズムを説明する。既知の一定時間間隔で出力される自己診断信号に同期して時間計測及び自己診断ループが開始される。同ループは外部入力であるモニタリング信号の処理が完了するまで待機する。モニタリング信号の受信後、外部割込み関数が動作し、伝搬予想時間と検出時間が一致する場合は正常とみなし、安全信号ロジックをLowに落とすためのタイマ割り込み関数を中断する。すなわち、安全信号は初期のHighレベルを維持し、センサシステムの正常を示す。一方、接触等による信号損失の場合や、モニタリング信号が何らかの原因で正常

に生成されず検出時刻が伝搬予想時間を超える場合においては、タイマ割り込み関数のオーバーフローにより安全信号がLowレベルに落ちることでセンサシステムの異常を示す。を停止する。

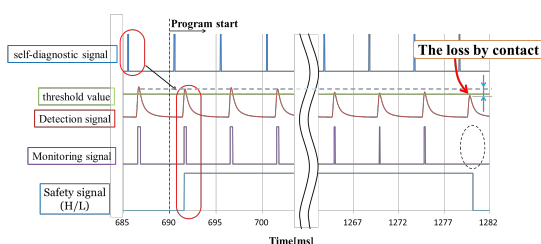
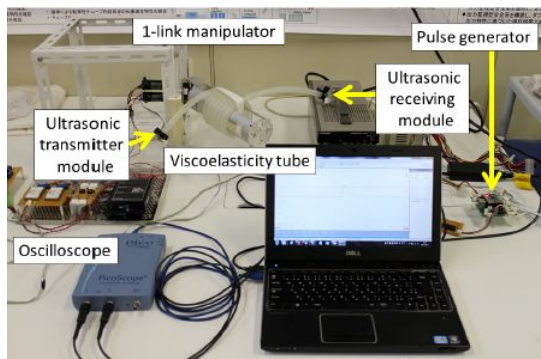


図 6

図 6 に、提案自己診断アルゴリズムの有効性検証実験装置及び結果を示す。実験では、チューブを 1 リンクアームに巻きつけ、両端に超音波送受信センサモジュールを取り付けた。自己診断信号生成及び診断プログラム実行、安全信号操作には MPU(sh7125)を用いた。実験結果を図 6 (下) に示す。同図から分かるように、自己診断信号に同期して超音波信号は発生、最終的にモニタリング信号が生成されていることが分かる。モニタリング信号が生成されている間には安全信号が High レベルを維持している。チューブに接触が発生すると、モニタリング信号が生成できず、安全信号は Low レベルになることが確認でき、提案アルゴリズムの有効性が示された。

本研究では、任意形状を有する粘弾性チューブ内を伝播する超音波の緒特性を明らかにし、自己診断に必要なモニタリング信号が正常に生成できる音圧閾値を設定する手法を確立した。また、同手法を用いて接触を含むセンサシステム異常が検出可能な自己診断アルゴリズムを開発した。これにより、広範囲での高信頼接触検出が可能な接触センサシステムの構築が期待できる。ただし、接触検出感度を向上するためには、現段階での円形状のチューブ断面形状を、チューブ押し込み量に対して超音波の音圧変化が大きくなるように工夫が必要で、今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 3 件)

神埜奨太, 鄭聖熹, 粘弾性チューブ内超音波伝搬を利用した安全確認型接触センサの開発 チューブ曲率を考慮した伝搬特性及び自己診断アルゴリズム - , 日本機械学会 ROBOMEC2014 講演会, 2014 年 5 月 28 日, 富山市。

神埜奨太, 鄭聖熹, チューブ内超音波伝搬を利用した安全確認型接触検出 曲率を持つ粘弾性チューブ内における超音波の伝搬特性 - , 計測自動制御学会第 13 回システムインテグレーション部門講演会, 2013 年 12 月 20 日, 神戸市。

神埜奨太, 鄭聖熹, 超音波を利用した安全確認型広範囲接触検知センサの開発 粘弾性チューブ内における超音波の伝搬特性 - , 日本機械学会 ROBOMEC2013 講演会, 2013 年 5 月 22 日, つくば市。

〔その他〕

<http://mechatro.osakac.ac.jp/hsr/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鄭 聖熹 (SEONGHEE, Jeong)

大阪電気通信大学・工学部電子機械工学科・准教授

研究者番号：50422176