

## 資料-1

## 研究概要報告書

( / )

研究題目	マイクロ作業用昆虫サイズロボットの微弱音響信号による意思伝達	報告書作成者	青山尚之
研究従事者	青山尚之、水谷謙一郎(静岡大学大学院院生)、細野美玲(電気通信大学学部研究生)		
研究目的	<p>これまでの基礎研究において、マイクロ工具・センサーなどを搭載した昆虫サイズのロボット群を設計・製作し、従来型の機械やロボットでは対応できないようなミクロン以下の微細作業精度を達成している。これらの多数の昆虫サイズロボットを同時に作業領域内で作業させる場合、状態や環境の様子を他のロボットに知らせる必要がある。しかしロボット自体が小さいため、従来ロボットのような高度な検出器、発信器を搭載できず、機能が集積された超小型の検出/音源機構の開発と信号解析について検討する必要がある。</p> <p>本課題ではまず極小の振動触覚に着目し、これを昆虫サイズロボットに搭載するとともに、障害物、作業状態などを音響信号として周囲のロボット群に伝え、これらが自律的に行動するようなシステムを構築することを最終目的としている。その基礎段階として、マイクロ振動子を触覚として使用するとともに、この振動によって発生した微弱音響を電子増幅回路など用いずに増幅・伝搬させるために、小型の共鳴器を設計し、その効果を確認する。</p>		

## 研究内容

## 1. はじめに

超小型ロボットに搭載可能なマイクロセンサやアクチュエータが必要になっている。最近のマイクロマシニング技術の発達により、様々な微小デバイスが製作可能になっている。一方、微細作業を行い、その状態を何らかの方法で周囲に伝達するためには、作業と信号伝達を考慮した機構を考える必要がある。この場合、マイクロデバイスを集積することが必要になるが、本課題ではマイクロ音叉に注目し、これを機械共振させ障害物との接触の有無などをその振動モードの変化により検出する機構を提案している。さらにその微小な振動音響を共鳴器により増幅し、周囲にその情報を伝達するシステムを設計し、その可能性について論じている。すでに基礎実験では超小型ロボットの振動触針により障害物の有無を検知することを行った。しかしここでは触針に添付した歪みゲージでその信号を一旦、外部コントローラに信号線により伝達し、ロボットを遠隔誘導制御していた。もし作業領域内で直接、小型ロボット同士が作業情報を無線で交換できれば、さらに高度な自律性と効率が期待できる。

## 2. マイクロ音叉を用いた振動触針

超小型のロボットの感覚器として光センサーや超音波センサーなどの利用が考えられるが、対象物に接触し障害物の有無や表面の状況を検知する"触角"は高い信頼性が得られる。実際、昆虫の幼虫は木々の色を触角で走査し、表面の硬さを推定していることが報告されている。(=柔らかい場合は、若い茎の緑に、逆は褐色の保護色に変色する)。複雑な画像処理方法を用いることなく、生存に最低限の知識と情報処理に基づいて行動している。ここでは図1に示すようなマイクロ音叉を触角として利用することを試みている。音叉の機械音響工学的な取扱いは別書に譲るが、U字型の振動子には1組の圧電素子が付いている。一方は共振励起用であり、他方は振動検出用である。この振動子の先端に触針を取り付け、対象物に接触させた時の振動状態が変化することを利用する。実際の寸法は長さ8mm、幅0.8mm程度であり、振幅は数ミクロンである。ミニロボット用の触角として十分な小型である。

## 3. 微小音響の共鳴器の原理と設計

## 3.1 原理

前章で述べたマイクロ音叉には圧電素子が添付されており、微小な振動は圧電素子により検出される。しかし振幅そのものは数ミクロンであり、音響信号として取り出すことは難しい。電氣的に増幅することは別途エネルギー供給が必要になるため、共鳴現象を利よ垂ることが強く望まれた。図2には音響発生する代表的な昆虫を示す。コオロギはやすり状の羽根と擦り器を擦り合わせて発音している。この原理に基づいて図3に示すように振動触針を紙に接触させて振動状態を音に変調する方法を試みた。しかし音響信号をあまり増幅させることができなかった。これは摩擦により発生させることのできる音の強度が原理的に大きくできないためである。セミは腹部に共鳴空洞を備えており、この一部を筋肉により振動させ、共鳴効果により音響を増幅している。これを機構的に実現させるために、図4に示すように一部に孔を開けた球を用いる。これはホルムヘルツの共鳴器であり、この孔をマイクロ音叉の振動部の近傍に設置すれば、微小な振動音を共鳴により増幅できることが予想された。

## 3.2 共鳴器の設計

振動触針に使用するマイクロ音叉の微小振動をできるだけ効果的に共鳴させるために、ホルムヘルツの共鳴器の設計法を適用する。図4のような球型の共鳴器の場合、空洞の容積 $Q$ 、音速 $c$ 、孔付近の導伝率 $G$ とする。 $G$ は孔の形状により定まる係数であるが、薄い壁の円形孔の場合は、 $G$ は直径に等しい値になる。共鳴器の固有振動数は次式で求められる。

$$f = c/2\pi \times \text{SQR}(G/Q)$$

この式により、小型ミニロボット搭載可能な寸法が与えられると、孔の直径を概ね計算することができる。

## 研究内容

## 4. 実験装置と実験結果

マイクロ音叉を振動させその振動音を共鳴器でどれだけ増幅できるか、またその触針の振動モードを周囲に伝達可能か否かを実験的に検証する。図5および図6に実験装置とその構成を示す。使用するマイクロ音叉は村田製作所であり、共振周波数は1000.0Hzのものを使用する。これを振動子に貼付された圧電素子で励起し、その振動子を球型共鳴器の孔に接近させている。そこで共鳴増幅させた音響の空間強度分布をマイクロフォンで計測する。

## 4.1 共鳴球の形状・寸法

ホルムヘルツ共鳴器の設計法に基づいて概算して得られた共鳴球がマイクロ音叉の微小振動を共鳴させることが可能か否かを実験的に確認した。図7には共鳴球の直径20,25,30,40mmに対して、孔径を1.7から5.0mmまで変化させた場合の共鳴音の強度を示す。この実験の結果、球径25mmで孔径3.6mmが最も大きな共鳴増幅率が得られることがわかった。ただし、孔とマイクの距離を30mmとし、マイクロ音叉と孔はできるだけ接近させている。

## 4.2 共鳴音の空間分布

この音叉と共鳴球により増幅された共鳴音の空間分布を図8に示す。この結果より、共鳴球がある場合は、ない場合に比べて100倍以上の音響増幅の効果が見られ、半径30cm以上にわたって人間にも共鳴音が認識できることが確認された。マイクロ音叉の微小な振動音を電気的なアンプを使用せずに増幅することに成功したことを示す。

## 4.3 位相差による距離測定

音叉とマイクの距離を音叉の入力励起信号とマイクロフォンで検出される共鳴音の位相差から求める。図9に距離と位相の関係を示す。ほぼ直線関係であり、1000Hzの音波の1波長は約34cmであることを考えると共鳴球からマイクで検出される距離内であれば、位相差で距離が測定でき、超小型ロボット間の距離を認識させることが可能になる。

## 4.4 触針による表面計測

図10にマイクロ音叉の先端に直径150ミクロンのタングステン針を取り付け、これを対象表面に接近させ、この時のマイクロ音叉の振動モードの変化をマイクロフォンで検出した結果を示す。5ミクロンずつ接近させた場合、位相に変化が生じることが確認された。この結果、表面の凹凸などは位相差から検出し、それを音響情報として伝達できることが確認された。しかし材質や表面状態(乾燥、油塗布面、軟質材)による違いは認識されなかったため、さらに検出信号の詳細な解析評価方法が必要であると言える。

## 5. まとめ

超小型自走機械に搭載可能なマイクロ音叉の発する微小な音をホルムヘルツ型の共鳴器で増幅させ、半径20cm以上にわたって信号を伝搬させることを確認した。マイクロ音叉の先端に触針を取り付けて、表面状態によって変化する振動状態を音により伝搬する実験を行い、ミニロボットの距離や機械的な凹凸は概ね位相変化として測定できることを確認したが、表面状態は確認することができなかった。今後はさらに詳細な設計法の確立と信号処理方法の検討を進める。

<p>研究のポイント</p>	<p>昆虫サイズのロボットに搭載可能な触覚器として、マイクロ音叉を搭載し、これを圧電素子で励起振動させる。これが対象物との接触の有無や対象物の硬さなどにより、振動モードが変化することを確認した上で、この微弱な音響振動を共鳴器を用いて増幅させるための最適形状を設計し、さらに周囲にそれらの信号変調を伝搬することが可能か否かを実験的に確認する。</p>
<p>研究結果</p>	<p>(1)圧電素子で励起可能な長さ8mm、幅0.8mm、厚さ0.3mm、共振周波数1000.0Hzのマイクロ音叉を精密加工技術で試作した。                  (2)このマイクロ音叉の共振振幅は1ミクロン程度であり、障害物との接触の有無や表面付近を走査させた時の微小な凹凸で振動モードが変化するが、音響信号として周囲では検出できないことを確認した。                  (3)この振動変化を電氣的増幅をせずに、周囲に伝搬する方法として、共鳴器(ホルムヘルツ型)を利用することを提案し、マイクロ振動子から発せられる微弱音響を増幅し、昆虫サイズロボットに搭載可能な共鳴器の最適寸法を設計した。                  (4)これらを確認するための実験装置を構築し、直径25mm、孔径3.4mmのホルムヘルツ型の共鳴球によって、1m以上離れても人間の耳で可聴になるほど(20dB以上)の共鳴効果を得ることが確認された。</p>
<p>今後の課題</p>	<p>(1)触覚として用いたマイクロ音叉が物体との接触状態によって、振動モードや位相などがわずかに変化し、この音振動の変化を共鳴器で外部に伝搬したが、表面状態の変化に対して、音響信号がどのように変調されるかのメカニズムについてはさらに精密な説明が必要であり、ニューラルネットを応用した復調解析などを計画している。                  (2)周辺の他の昆虫サイズロボットに取り付けたマイクロフォンで検知し、作業情報が相互に伝達されれば次の行動を自律的に決定することが可能になり、昆虫サイズロボット群による協調作業の実現に向けて検討を進める。</p>

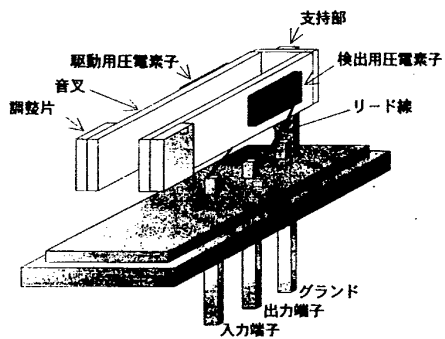


図1 試作したマイクロ音叉の構造

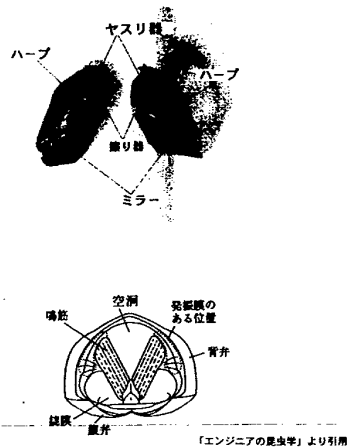


図2 昆虫の発音機構 (コオロギとセミ)

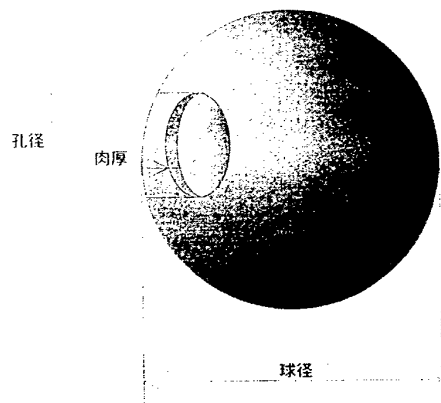


図4 ホルムヘルツの共鳴器モデル

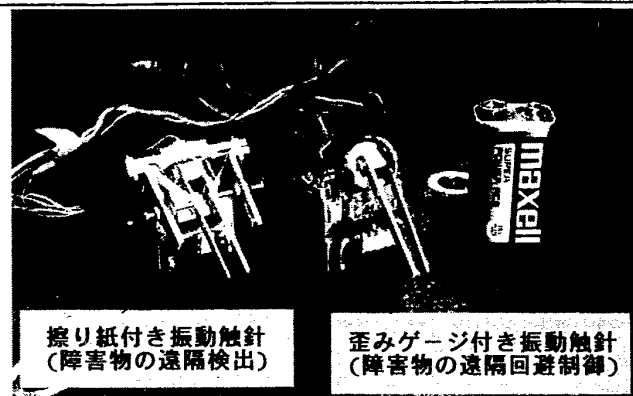


図3 これまでに試作した精密作業用ミニロボットと振動触針



図5 マイクロ音叉と共鳴器を用いた実験装置

(注:フローチャート図,ブロック図,構成図,写真,データ表,グラフ等 研究内容の補足説明にご使用下さい。)

様式-10( / )

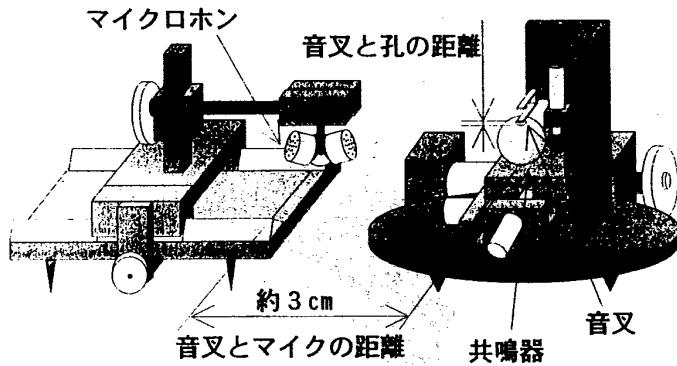
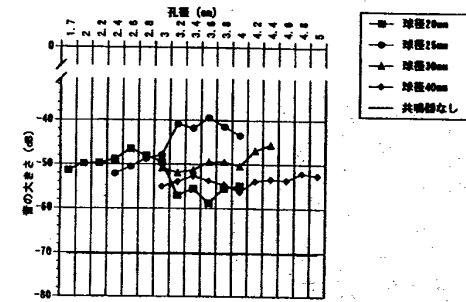


図6 共鳴音の空間分布の測定装置



入力電圧 ±2.0V  
出力電圧 ±1.7V  
共振周波数 994Hz  
マイク位置 3cm

図7 共鳴球の寸法と共鳴増幅率

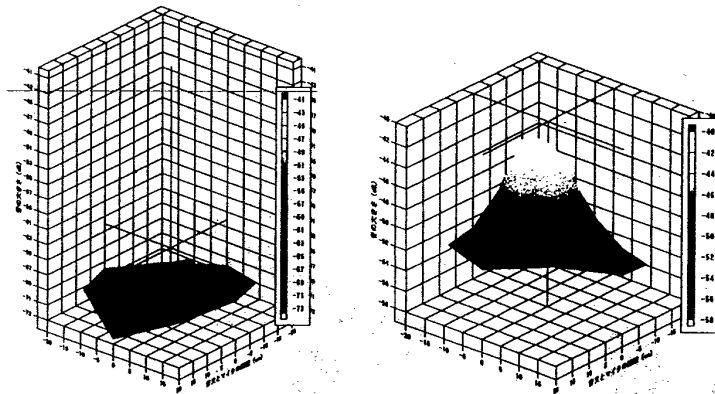
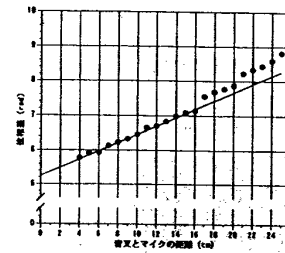
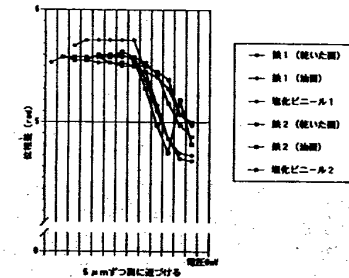


図8 共鳴器の効果  
(左: 共鳴器無し、右: 共鳴器あり)



入力電圧 ±1.4V  
出力電圧 ±2.0V  
共振周波数 998Hz

図9 マイクロ音叉とマイク  
間距離と位相差



入力電圧 ±1.4V  
出力電圧 ±2.4V  
共振周波数 998Hz

図10 走査表面の材質と  
位相/強度比

(注: フローチャート図, ブロック図, 構成図, 写真, データ表, グラフ等 研究内容の補足説明にご使用下さい。)

様式-10(2)