研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

研究題目	超音波の放射力による非接触搬送システムの開発	報告書作成者	小山　大介
研究従事者	小山大介，加島良太，松川真美		
研究目的	電子部品や医薬品錠剤など mm オーダの微小製品の製造ラインでは，生産数が多く，かつ低い不良率が求められるものの，現在の主流であるベルトコンベアによるライン搬送では少なからず製品に破損・汚染が生じてしまう．また，これらの製品一つ一つを製造工程においてカメラ，もしくはその他の手法でモニタリングする場合，ライン上に等間隔に並べることが求められる．これらの問題を解決するため，これまでに数多くの研究グループにより，数 mm オーダの微小物体の非接触搬送技術が報告されている．これらの主な手法としては，空気圧，静電気力，磁力を利用したものが挙げられる．例えば磁力を使った搬送技術の場合，複数のコイルと磁石を利用して，搬送路内の磁場を制御し，物体の非接触搬送を実現している．しかしながら，搬送対象は磁性体に限定され，それらに働く重力に打ち勝つための強力な磁場を発生する必要があるため，搬送対象が電子部品等の場合には，その性能に影響を及ぼす危険性がある．また空気圧による手法では，エアコンプレッサや配管が必要となり，システム全体が大型・複雑化する．本研究で注目する超音波を用いた手法では，搬送対象を選ばず，固体のみならず液体も非接触搬送可能であることから，バイオテクノロジー分野も含めた広い製造分野及び研究分野への適用が可能である． 超音波による物体浮揚および搬送技術についてはこれまでに数多く報告されている．しかしながら，空気中において超音波による非接触搬送を実現する場合，搬送物体に働く重力に耐えうるため，強力な音場を発生する必要があるが，超音波が空気中を伝搬する際の減衰により，搬送可能な範囲が限定されてしまう．また，これを広範囲に広げる場合には多数の超音波振動子が必要となる．そこで本研究では，搬送路自体が超音波の伝搬路，すなわち導波管となり，その導波管内に強力な超音波を発生させることにより，少数の超音波振動子で長距離伝搬可能な超音波式非接触搬送システムの実現を目指す．本システムは主に超音波振動子，導波管となる搬送路，振動子駆動回路で構成されるため，搬送路を簡単に組み替え可能で，低価格で実現できる可能性がある．申請者らのグループでは超音波非接触搬送技術について，これまでに直線搬送，周回搬送，直線搬送結合部，高速搬送技術，液体搬送技術などの各技術を開発してきた．本研究の最終目的は，強力な超音波の放射力用いて大きさ数 mm 程度の物体を浮揚させ，そのまま非接触で数m以上長距離搬送し，数 10 μm の位置決め精度を有し，あらゆる生産設備に対応可能な超音波式非接触搬送ラインの開発である．本報告では特に，2次元平面内を任意の方向に非接触搬送可能な技術について検討した．		

研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

研究内容	本研究では，2 次元平面内において任意の方向に微小物体を搬送可能な，超音波式非接触搬送システムを開発した．提案する搬送システムは，搬送ライン自身を超音波振動体として利用する単純な構造である．搬送ラインを超音波導波路として利用し，搬送ライン中に超音波のエネルギーを閉じ込めることにより，少ない超音波振動子数でその内部に強力な超音波定在波を発生させ，微小物体を効率的に非接触で浮揚できる．超音波振動子への入力電気信号によって搬送ライン中の超音波の圧力分布を制御することにより，浮揚した物体を高速かつ数 10 μm オーダの位置決め精度で搬送することができる．本研究では特に以下の項目について検討した． ・ **2 次元搬送システムの設計** システムは 4 つのボルト締めランジュバン型振動子と，振動子の振動振幅を増幅するためのステップホーン，振動子と結合する矩形振動板とそれと並行に設置する矩形超音波反射板で構成される．少ない消費電力でより重い物体の搬送を実現するため，システムの外形を有限要素解析（有限要素解析ソフト（ANSYS 11.0））により設計した．具体的には，振動板全体の平均振動振幅が最も大きくなる様，振動子，ステップホーン，振動板の形状，および振動子と振動板の取り付け位置を決定した． ・ **導波路の振動測定および導波路内の音場測定** 設計に基づいた試作機を作成し，矩形板の振動分布および導波路内の音場分布を測定した．振動板に対して並行に反射板を配置し，これら 2 つの板間の距離を調節することにより，板間には音響定在波が発生し導波路として動作する．各振動子への入力信号を変化した場合の矩形板の振動分布をレーザドップラ振動計にて測定した．また導波路間の音場を，プローブマイクロフォンを用いて測定した．有限要素解析結果と比較することにより，所望の音場モードの発生を確認した． ・ **物体の 2 次元搬送** 4 つの振動子の入力信号を調節することにより，矩形板振動分布の制御を試みた．最初に 2 個 1 組の振動子の入力信号を同一とすることにより，1 軸方向への搬送を試みた．次に 4 つ全ての振動子への入力信号を制御することにより，2 次元平面内での任意方向への搬送を試みた．搬送の様子を高速度ビデオカメラで観測し，測定した振動分布および音場分布との関連性について検討した． ・ **システムの耐荷重** 導波路間において体に働く音波の放射力と重力とのバランスから，非接触搬送可能な物体の重量について理論的に検討した．

研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

研究のポイント	・ 2 次元搬送システムの設計:空気中の音波伝搬時の減衰を考慮すると，システム駆動時の騒音問題より，超音波領域(20 kHz～)でより低周波な駆動周波数を選択する必要がある．また少ない超音波振動子数かつ低消費電力で，より強力な超音波定在波を発生させることが，実用化を考慮した場合のキーとなる． ・ 境界条件や材料定数等の問題により，有限要素解析結果と試作機による実測値との結果は多少なりとも異なることが予想されるため，有限要素解析で決定したシステムの外形付近で，実際にいくつかの試作機を作成し，最も効率的な形状を決定する必要がある． ・ 2 次元平面内での非接触搬送技術を実現するため，振動板・反射板間の音場制御技術が必要となる．実際に作成した試作機を用いて，4 つの振動子への入力信号を制御することによりこれを実現するが，振動板・振動子・駆動回路間のインピーダンスマッチングを考慮する必要がある．
研究結果	・ 2 次元搬送システムを設計した(**図 1**)．アルミニウム製振動板(外形:170×170×1 mm^3)の端部から(x, y) = (12 mm, 12 mm)の位置に 4 つの振動を取り付け共振周波数 24.8 kHz で励振することにより，波長 29 mm の強力な格子状たわみ振動が発生した(**図 2**)． ・ 振動板と反射板の距離を 8.0 mm とすることで，振動板に格子状たわみ振動が励振された場合，板間には半波長の強力な音響定在波が発生し，微小物体を浮揚することに成功した．振動子への入力電圧が 40 V_{pp} の場合，最大音圧値は 760 Pa であった． ・ 直径 2 mm，重量 0.3 g のポリスチレン球を搬送対象とし，非接触搬送に成功した(**図 3**)．2 つ 1 組の振動子間駆動位相を制御することにより，物体を x 軸，y 軸方向に直線搬送可能で，搬送距離と位相差変化量の関係はほぼ線形(0.045 mm/deg.)であった(**図 4**)． ・ 4 つの振動子の駆動位相差を制御することにより，任意方向への直線搬送を実現した．特に，斜め 45°方向への移動する場合，対角方向に位相差駆動することにより実現した(**図 5**)．
今後の課題	本研究では，直径数 mm の微小物体の非接触 2 次元搬送を実現したものの，あらゆる生産設備への適用化を目標とした場合，下記の項目を検討する必要がある． ・ 搬送技術の多機能化:現状では，直線および・周回搬送しか実現できていないが，物体の回転，板状など様々な形状の物体搬送，複数の物体を同時に搬送など様々な機能を実現する必要がある． ・ 搬送特性の改善:理論的にはさらなる搬送物体の耐荷重の向上が見込めるため，強力な音場を実現することによりこれを達成する．また微視的には直線搬送時に，搬送軌跡が湾曲してしまうため，これを改善する必要がある． ・ システム構築の簡便性:提案システムでは，振動板・振動子間のボルト締結部の接触状態や，4 つの振動子の共振特性のずれやわずかな変化により搬送特性が大きく変化してしまう．今後より簡単な構造で再現生の優れたシステムを設計する必要がある．

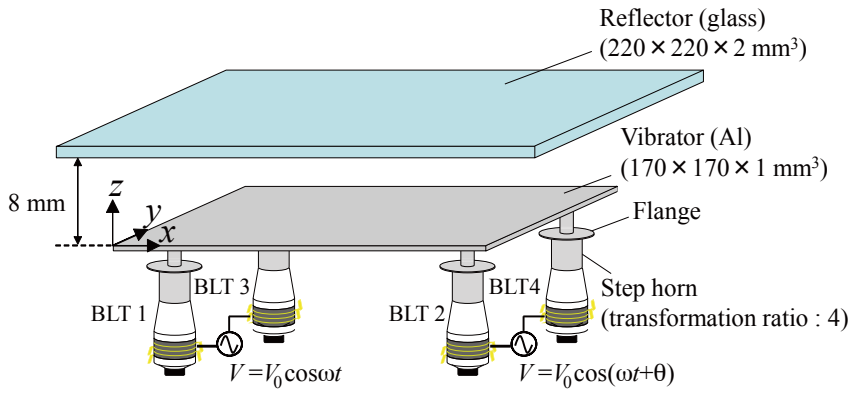

図 1 システム構造

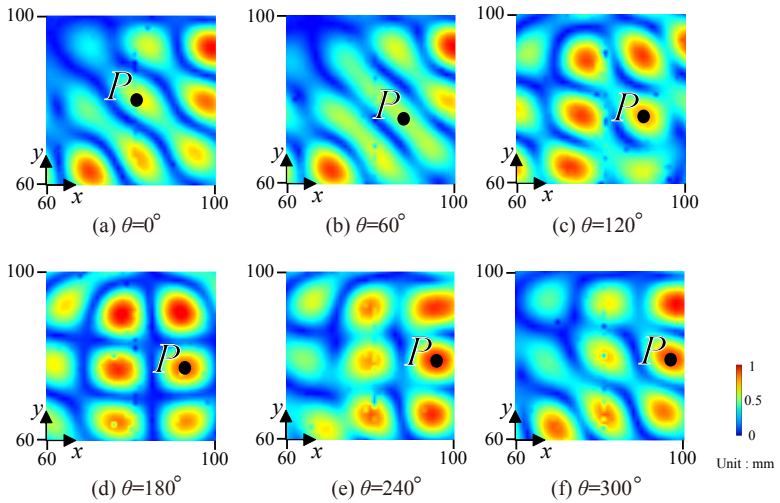

図 2 板の振動分布(駆動位相差変化時)

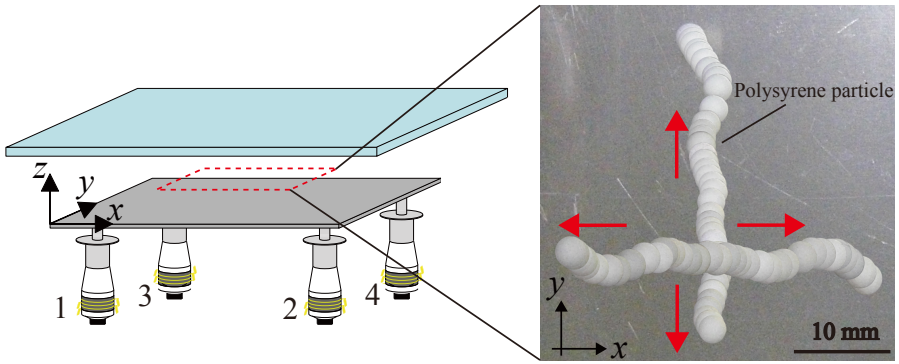

図 3 球の直線搬送の様子

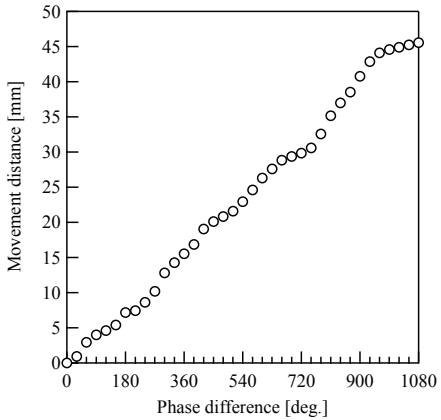

図 4 位相差と搬送距離の関係

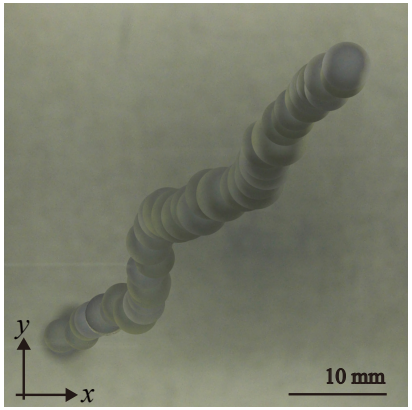

図 5 斜め方向への搬送の様子