

面状柔軟変形ロボットによる不整地環境での全方向移動の実現

千葉工業大学 工学研究科 未来ロボティクス専攻*

青木 岳史

1. はじめに

自然界には自身の体を柔軟に変形させて環境に対応させる生物が多く存在する．もし柔軟に変形可能なロボットを実現することができれば，図 1 へ示すようにこれまでの剛性の高いロボットでは実現のできなかった作業が可能となる．近年は形状を柔軟に変形させて運動を生成するソフトロボティクスの研究が世界で盛んに行われている．これまでは型を作成し，シリコーンの射出成型によって空圧アクチュエータを製作していたが，近年の 3D プリンタ技術の発展により容易に型が作成できるようになったため，従来よりも簡単にこの研究分野へ参入できるようになった．しかしアクチュエータ形状の革新的な発展にまではまだ結び付いていないのが現状である．

本研究では特に図 1 の (b) へ示す面状のソフトロボットに着目をしている．面状の移動体であれば，足場が崩れやすい危険な場所でも機体全体で地面に対する圧力を分散し，地形を崩さずに移動することができる [1][2]．本研究では災害現場での瓦礫の拡張作業や被災者の運搬作業へ適用可能な面状の柔軟変形ロボット（図 2）の開発を行い，不整地環境での全方向移動の実現を目的とする．

2. 先行研究と課題

面状柔軟変形ロボットは，図 3 へ示すように 2 方向へ屈曲可能な空圧アクチュエータで構成する単位節を複数個連結して機体を構成する．そして屈曲動作を組み合わせることで移動に必要な進行波を生成し，異なる方向の進行波を合成することで全方向移動を実現する．進行波の生成には各単位節を独立で制御する必要があるが，図 3 へ示す第 1 試作モデルでは各気室に対して電磁弁を同じ数だけ外部に持つ必要があり，さらに各単位節と電磁弁を接続するチューブの束が運動を妨げていた．そこで本研究では進行波を自動生成可能であり，かつロボット内部に配置可能な空圧自励制御弁の開発も進めてきた [3]．図 4 に示す空圧

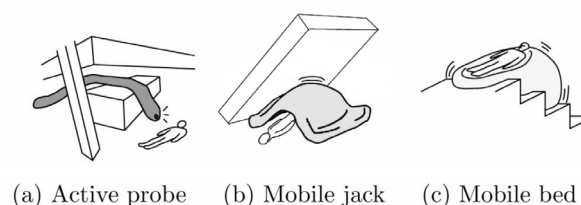


図 1 柔軟変形ロボットの応用例

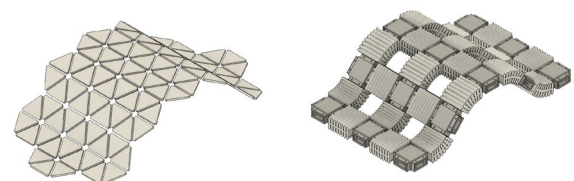


図 2 面状柔軟変形ロボット

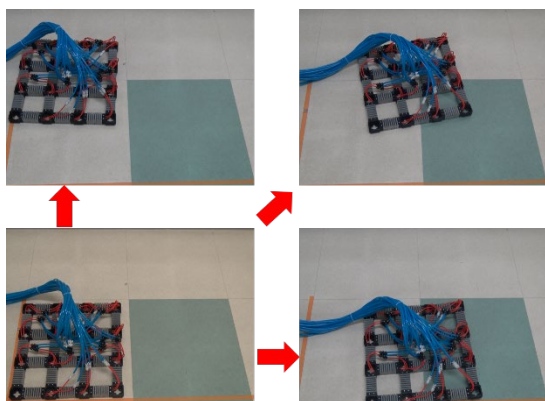


図3 第1試作モデルによる全方向移動

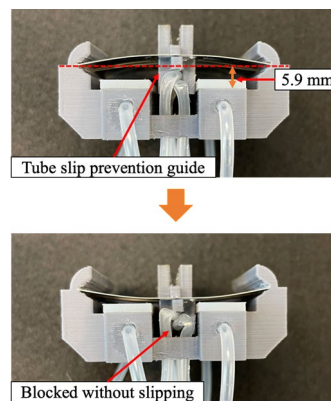


図4 空圧自励制御弁

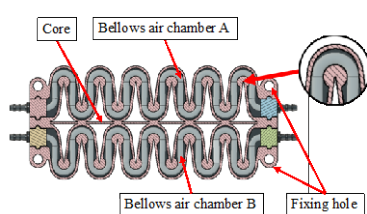


図5 配管を内蔵した第2試作モデル



図6 進行波による移動の実現

自励制御弁は弁内部に板バネが配置されており、その板バネによってチューブを折り曲げる事によって流路を閉止する。そして空圧アクチュエータの気室の圧力に感応して板バネが飛び移り座屈を起こすことに間欠的に流路を切り替える。本助成の研究の当初の計画では空圧自励制御弁の開発を継続する予定であったが、新しい空圧アクチュエータの開発に注力したため、空圧自励制御弁の開発については行っていない。

先行研究では各気室へ空気を供給するチューブを内部に配置可能な単位節の開発を行ってきた。図5に示すようにアクチュエータ内部の気室を単室へまとめ、他の単位節へ空気を供給するチューブを気室に沿って配置した。これにより各単位節から外部へチューブを出す必要がなくなり、複数の単位節を連結することが可能となった。図6は4個の単位節を連結し、各単位節の屈曲を外部に配置した空圧制御自励弁によって切り替えて、生成した進行波によって移動を実現したものである。

本助成の研究では単位節での屈曲角を拡大した空圧アクチュエータの構造を新たに考案し、移動効率を向上させた進行波の生成を目的とする。また線状から面状へ拡大した試作機の開発についても行う。

3. 新しい空圧アクチュエータの開発

第2試作モデルは図5へ示すように上下に配置された蛇腹形状の気室と、上下の気室の間に配置された変形を拘束するための中立板によって構成する。蛇腹形状の気室へ加圧すると気室が伸び始めるが、中心に位置する中立板が伸びを拘束するため、屈曲モジュール全体が扇形状へと屈曲する。しかし第2試作モデルでは図7へ示すように、屈曲動作において中立板より下側の圧縮される気室の密着長に制限があり、屈曲角を拡大できない原因

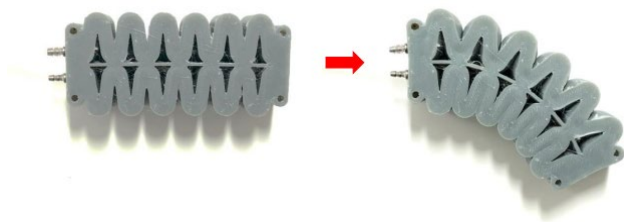


図 7 第 2 試作モデルの問題点

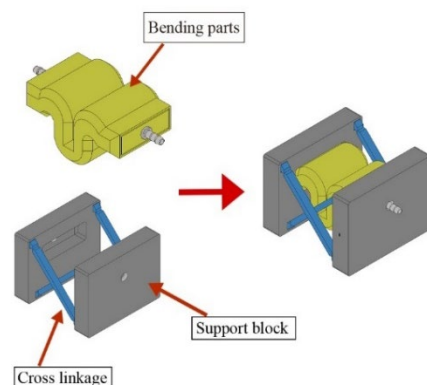


図 8 第 3 試作モデルの構成

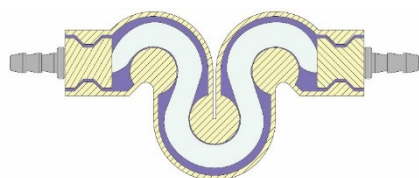


図 9 屈曲モジュールの内部構造

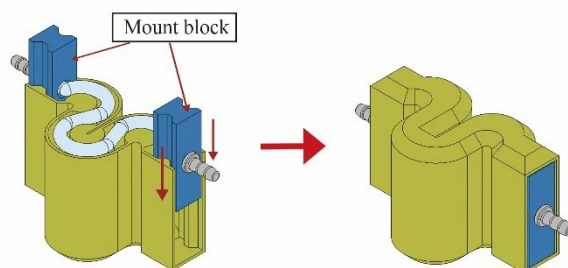


図 10 チューブの内蔵

であった。

そこで本研究では新たに第 3 試作モデルを開発した。第 3 試作モデルは図 8 へ示すように、大きく湾曲した形状の気室を持つ屈曲部、クロス形状のリンクとサポートブロックで構成する拘束部で構成する。湾曲した気室へ加圧すると気室が伸び、サポートブロックを外側へ押し出す。そしてサポートブロックはクロスリンクによって動きを規制されているため、屈曲モジュール全体が扇形へと変形する。クロスリンクは非常に細く対偶に回転軸を作る事ができないため、一部の厚みを薄くすることにより弾性変形によって実現した。

面状移動体は複数個の屈曲モジュールを連結させて構成するため、各気室の内部に他の屈曲モジュールへ空気を送る流路となるチューブを配置する必要がある。第 3 試作モデルでも気室の湾曲形状に倣ってシリコンチューブを内部へ配置し、気室の変形を妨げない様にするためにフローティングされた状態で配置した。さらにチューブの座屈を防ぐために接触する気室の内部形状を図 9 の様にした。また通常の 3D プリンタの造形では一括で気室を閉じる段階まで造形を行うが、その場合はシリコンチューブを気室内へ配置することができない。そこで気室を 9 割ほど造形した時点で 3D プリンタを停止し、図 10 の左図のようにマウントブロック、シリコンチューブ、ミニマル接手を組み立てた物を接着し、図 10 の右図の様に造形を再開して蓋をする事とした。図 11 へ試作した部品（左から屈曲モジュール、クロスリンクの構造材、サポートブロック）を示す。

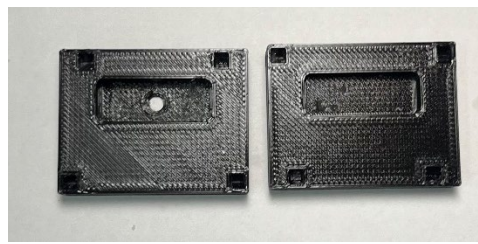
先行研究では開発環境としてダイレクト式の 3D プリンタを使用していたが、本研究より高速造形が可能なボージェン式の 3D プリンタを使用することとなり、新たに造形する素材の検討を行う必要が発生した。先行研究では屈曲モジュールの造形に Ninja Flex(熱可塑性エラストマー)を使用していたが、ボージェン式の 3D プリンタは素材の押し出しを行うギア部がノズルから離れているため、軟質素材では押し出し時にチューブ内で座屈が発



屈曲モジュール



リンク



サポートブロック

図 11 第 3 試作モデルの造形



加圧前



加圧後 (150KPa)

図 12 第 3 試作モデルの動作実験

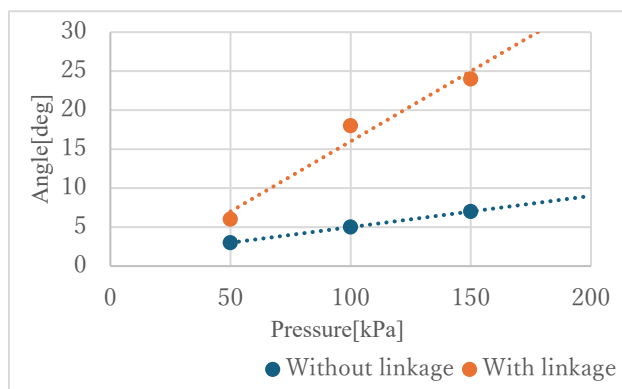


図 13 クロスリンクの有無による屈曲角の比較

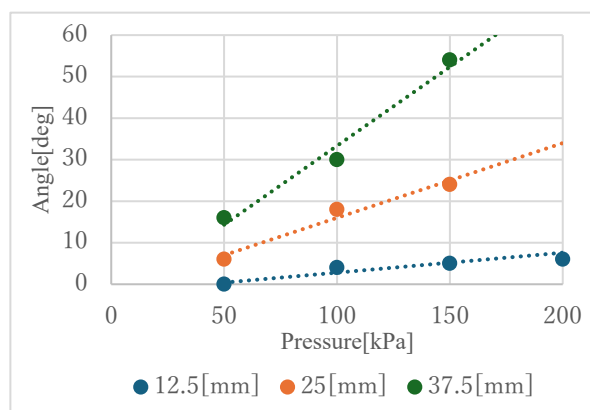


図 14 屈曲モジュールの幅による屈曲角の比較

生してしまい正常な射出ができなかった。そこで Ninja Flex より硬質である eTPU-95A を採用した。そして造形後の気密性と射出時の安定性を評価する試作実験を行った。Ninja Flex では造形後に目視可能な穴があり、またノズルの中で座屈して造形に失敗する事も多くあった。eTPU-95A は Ninja Flex と比べて柔軟性では劣るが、射出及び造形の安定性に優れていることが確認できた。また造形スピードを 20mm/s から 100mm/s へ変化させた場合でも空気漏れがなかった事から、造形物の気密性を向上させるためには造形のスピードよりも積層ピッチが重要であることが分かり、造形時間の短縮化が可能となった。

試作した屈曲モジュールを使用して屈曲動作の確認実験を行った。図 12 の左図は加圧前の状態であり、右図は 150KPa の加圧を行った時の状態である。クロスリンクによってサポートブロックへ曲げモーメントが発生し、屈曲角を増大させていることが確認できた。

図 13 にクロスリンクの有無による屈曲角の比較を示す．両方共に圧力の上昇に伴い屈曲角が増大しているが，クロスリンクが変形方向を拘束する方が屈曲角の拡大に有効である事が分った．図 14 に屈曲モジュールの幅を変化させた際の比較を示す．屈曲モジュールの幅を広くすると屈曲モジュールの壁面同士の接触面積が大きくなり，気室の膨らみによる押し出し量が拡大するため屈曲角が大きくなる．また試作した屈曲モジュールは 200KPa 以上の加圧を行うと空気漏れが発生したが，再設計により最大で 250KPa までは空気漏れが発生せずに屈曲動作ができる事を確認した．最終的には対抗する 2 個の屈曲モジュールによって往復運動を実現するために，加圧していない屈曲モジュールを逆方向へ屈曲させる必要があり，気室を逆方向へも曲がり易い形状とする必要がある．

4. 変形量の拡大

第 3 試作モデルまでは気室が膨張する際に湾曲して接する面同士が押し合って屈曲すると仮定していた．しかし屈曲モジュールとしての変形量を拡大するためには図 15 へ示す形状の方が適していることが試作を通じて分かった．図 16 へ示すように，屈曲角が大きくなるのではなく，両端の間の距離が大きく変位するため，クロスリンク機構による拘束と併せる事で屈曲角の拡大が可能となった．この図 15, 16 のモデルを第 4 試作モデルとする．この内部構造であると内蔵するチューブが座屈する危険性を大幅に減少させる事ができる．第 3 試作モデルまでは 3D プリンタでの造形を中断してチューブを挿入し，最後に蓋を造形していたが，造形の再開時にわずかに隙間ができてしまうため，空気漏れの原因となっていた．また気室の造形後にチューブを通すと，内壁との摩擦があり通す事が困難であったため，図 17 へ示すように 3D プリンタでの造形時にガイドとなる針金を挿入し，造形後にシリコンチューブの端部を針金によって誘導する事により通す事が可能となった．これによりチューブを内蔵し，かつ気室の気密性を損なわない製作方法確立した．

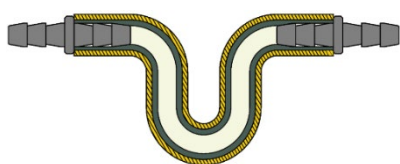


図 15 第 4 試作モデル



図 16 第 4 試作モデルの空圧による変形

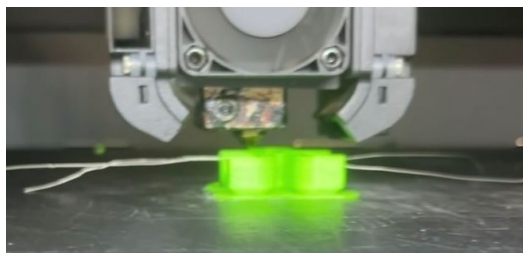


図 17 造形時に誘導用の針金を挿入

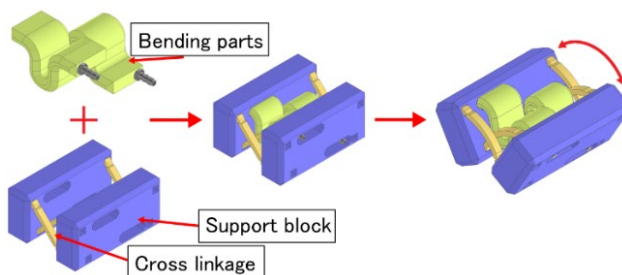


図 18 第 4 試作モデルの構成

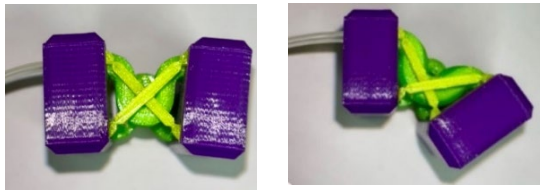


図 19 第 4 試作モデルの屈曲

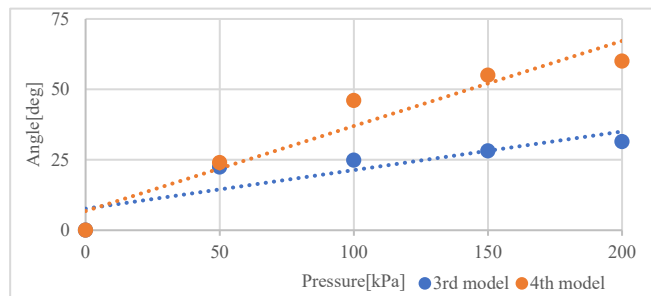


図 20 屈曲角の比較

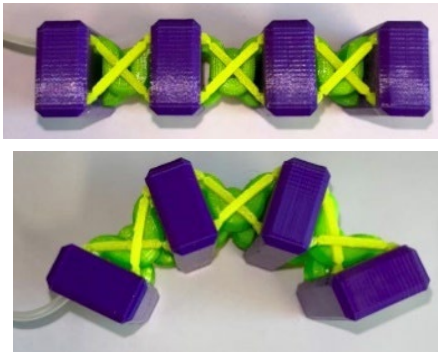


図 21 単位節による屈曲

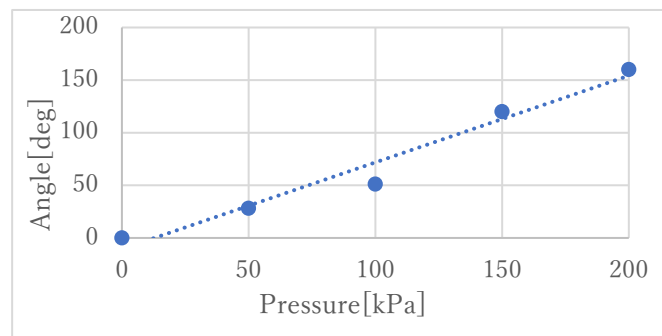


図 22 単位節による屈曲動作の確認

図 18 に第 4 試作モデルの構成を示す．屈曲モジュールとして TPU（熱可塑性ポリウレタン）製の気室が PLA（ポリ乳酸）製のサポートブロックの間に 2 個配置され，両脇に TPU 製のクロスリンクを配置する構造とした．片側の気室に送気する際は逆方向の気室を排気するため，2 方向への屈曲が可能となる．第 4 試作モデルを用いて屈曲動作の確認実験を行った．屈曲動作は 50kPa から 200kPa までの加圧で行った．この時の屈曲動作の様子を図 19 に示す．また 200kPa 以上はチューブが圧力によって継手から抜けてしまい，計測することができなかった．図 20 に第 3 試作モデルとの比較を示す．50kPa を加圧した時点では屈曲角度に大きな差は無いが，圧力上昇に従って差は大きくなり，200kPa の加圧時には屈曲角度の差は約 2 倍となった．

図 21 の上図に屈曲モジュールを 3 個連結した物を示す．気室内部へ送気するチューブは全て接続されているため，外部からの送気により同期して屈曲を行う．この連結した状態を 1 単位節とする．図 21 の下図に屈曲した状態を示す．また図 22 は動作実験の結果であり，圧力に対する屈曲角の特性を示したものである．

5. 面状柔軟変形ロボットへの拡張

面状柔軟変形ロボットは連結した屈曲モジュールの動きにより生成した進行波によって推進するため，進行波の振幅を大きくする事で移動効率を向上させることができる．そのためには屈曲モジュールの変形量が多い方が望ましいため，本研究では第 4 試作モデルを使用して面状の機体を製作することにした．図 23 はジョイントブロックを用いて 3 個の単位節を接続して 1 次元形状にした物である．各単位節の屈曲モジュールの内部には隣接する単位節への送排気用チューブが内蔵されており，外部の電磁弁によって各単位節

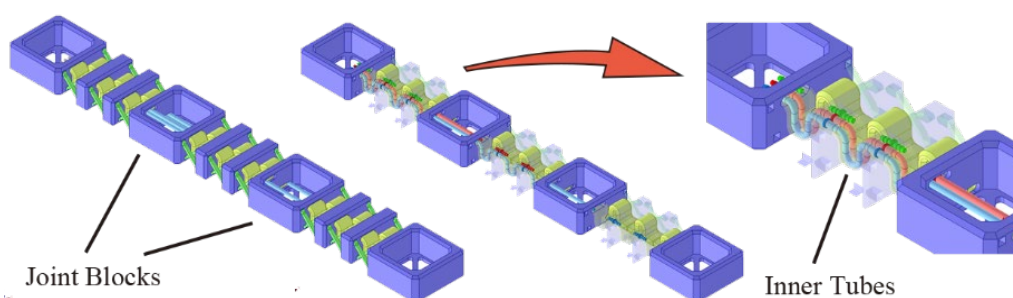


図 23 1次元形状（単位節の直連）

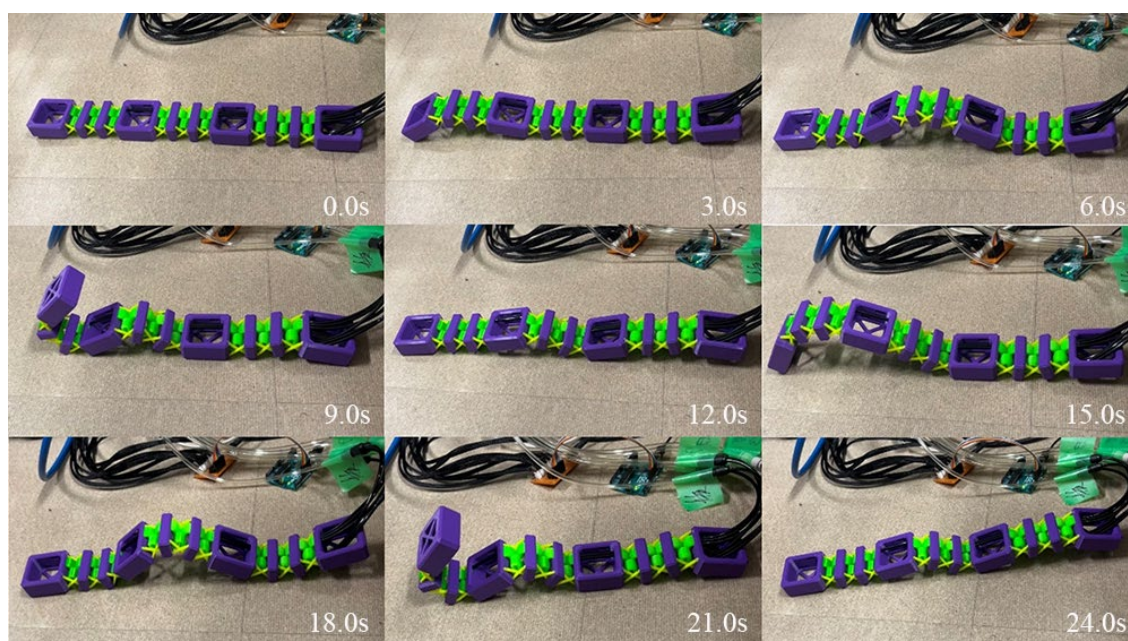


図 24 1次元形状での動作実験（進行波の生成）

の2方向への屈曲を独立に制御することができる。

進行波が生成可能かを確認するために1次元形状での動作実験を行った。実験には3単位節を連結した物を用い、外部の6個の電磁弁によって制御を行った。実験の結果を図24に示す。動作実験より進行波の生成ができている事を確認できたが、PLA製のジョイントブロックと床との摩擦が小さく、前進することはできなかった。また各単位節の屈曲動作によって出力できる曲げモーメントが小さく、複数の単位節が接続されている状態では想定よりも自重を持ち上げる事ができなかった。圧力を上げる事によって屈曲の曲げモーメントを増大させる事ができるが、400KPaを超えると気室が破裂するため、それ以上の圧力での動作はできなかった。低い圧力でも必要十分な動作が可能な気室の形状を再検討する必要があると考える。

本研究では期間内に進行波の生成による全方向移動は実現できなかったが、24個の単位節を井桁状に組み合わせて構成した面状柔軟変形ロボットを製作した。しかし1次元形状での移動が実現できなかったため、今後は屈曲モジュールの再設計と、進行波の生成に必要な単位節数の再検討を行う。

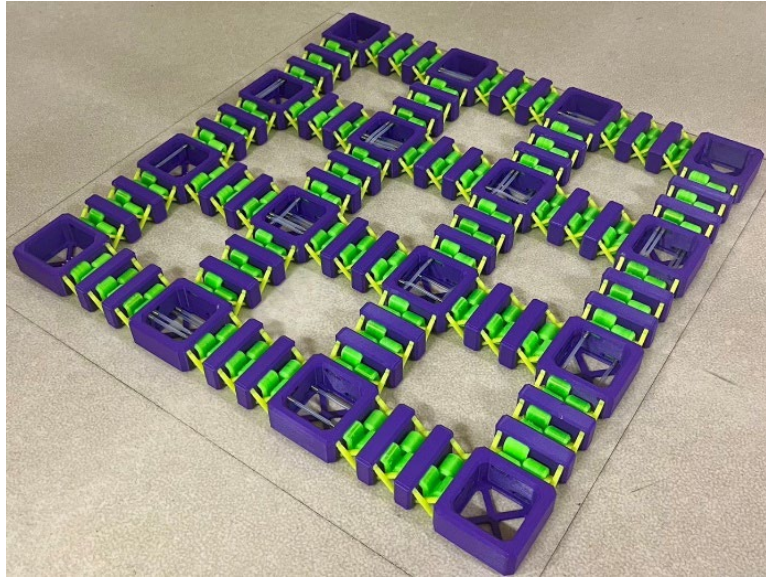


図 25 本研究で製作した面状柔軟変形ロボット

9. まとめ

本研究では全方向移動が可能な面状柔軟変形ロボットの実現を目的とし，内部にシリコンチューブの配管を持ち，複数個を直列に連結可能な屈曲モジュールの開発を行った．また拘束要素としてクロスリンクを用いる事で，従来の試作モデルよりも大きな変形量を実現した．今後は屈曲モジュールの形状を見直すことで出力増加を行い，面状柔軟変形ロボットによる移動効率の高い全方向移動を実現する．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました．ここに記して謝意を示します．

参考文献

- 1) 藤邦彦， 程島竜一， 琴坂信哉： "板状機能体の研究-第 1 報:機械モデルの構成法と移動法の提案-"， 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016， 1A1-12a1， 2016.
- 2) 渡辺将広， 塚越秀行： "カタツムリの運動を参考としたシート形進行波生成アクチュエータ"， 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会， 1A1-12b6， 2016.
- 3) Takuya Hada, Kenta Iguchi, and Takeshi Aoki: "Development of Flexible Deformation Mobile Robot Composed of Multiple Units and Pneumatic Self-Excited Valve," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.34, No.2, pp.478-485, 2022

研究テーマ 面状柔軟変形ロボットによる不整地環境での全方向移動の実現

所属・研究者名 千葉工業大学 先進工学研究科未来ロボティクス専攻 教授 青木岳史

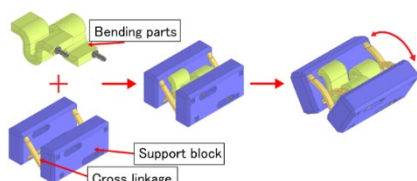
〔目的〕 災害現場などでも移動可能な面状の柔軟変形ロボットを開発する。

研究概要〔内容〕 全方向移動に必要な進行波の振幅を大きくするために単位節を構成する屈曲モジュールの変形量を新機構により拡大する。

〔成果〕 新たに拘束要素を追加する事で従来の試作モデルよりも大きな屈曲角を得る事ができた。全ての配管用チューブを内蔵する新しい形状の屈曲モジュールを開発し、面状柔軟変形ロボットを構築した。



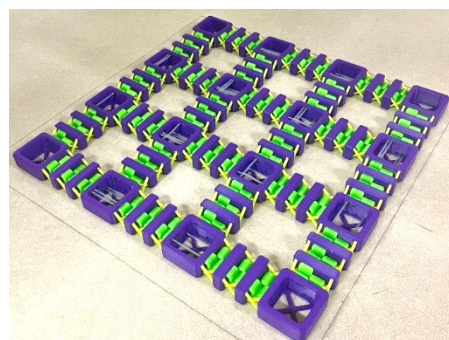
気室形状の再設計



屈曲モジュールの構成



拘束要素による
変形量の拡大



面状柔軟変形ロボット