

柔軟物の力学的機能を活用した 瞬発力によるアシストデバイスの開発

Development of Human Assist Device based on Impulsive Forces Generator using Mechanistic Functions of Closed Elastica

1081030

研究代表者 筑波大学 システム情報工学研究科 准教授 望山 洋

【研究の目的】

背景と目的

製造業、農業、医療・福祉などの多くの現場において、部品や荷物の運搬や積み込み、起立補助などの力作業が数多く存在する。これらの作業における身体的負担の軽減に対するニーズは極めて高く、近年、様々な作業アシストデバイスが開発されている。しかし、アシストデバイスが出力できる力・速度とデバイスのサイズ・重量の間には、トレードオフの関係がある。すなわち、高出力を求めれば、デバイスの大型化、重量化をまねき、据え付けでの使用など、デバイスの使用環境が限定される。逆に、小型・軽量であれば、可搬性には優れるが、デバイスの出力が小さくなり、大きな力を必要とする作業のアシストは困難である。

力作業の典型は、質量 $m[\text{kg}]$ の重量物を、重力加速度 $g[\text{m/s}^2]$ の重力に逆らって、ある高さ $h[\text{m}]$ まで持ち上げることである。エネルギーの観点から言えば、この作業は、重量物に位置エネルギー $mgh[\text{J}]$ を付与することと見ることができる。物体に位置エネルギーを付与する最も効率の良い方法は、重力方向と逆向きの瞬発的な力を物体に作用させて移動させることである。実際、人間の行う力作業に注目してみると、ある種の力作業では、瞬発力を効果的に利用していることに気づく。例えば、重い荷物を持ち上げる際には、持続的な力ではなく、瞬発力を利用して、荷物をある一定の高さにまで持ち上げる。スポーツにおける重量上げも、瞬発力アシストの好例である。ゆっくりとした動作では、重いバーベルを持ち上げることは困難である。本研究の目的は、可搬性を有するほど小型で軽量の、瞬発力による作業アシストデバイスの開発である。

問題の本質

コンパクトな瞬発力発生装置のアイデアは、跳躍移動ロボットの研究の中に多数見つけることができる。瞬発力発生装置の例として、圧縮空気ボンベを利用した空気圧式、燃焼による爆発式、振りコイルばねと偏心カム、あるいは、ばね鋼などの弾性柔軟物の変形を利用した弾性変形式

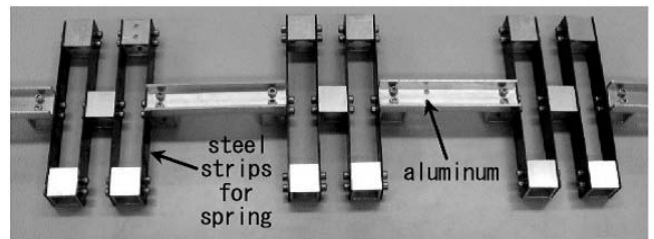


Fig. 1: Proposed elastic structure

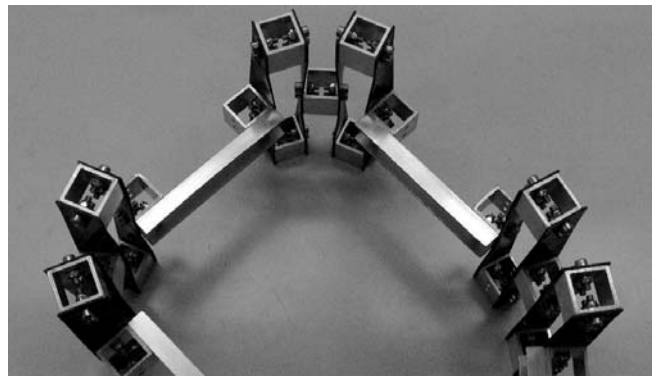


Fig. 2: Proposed elastic structure in flexion

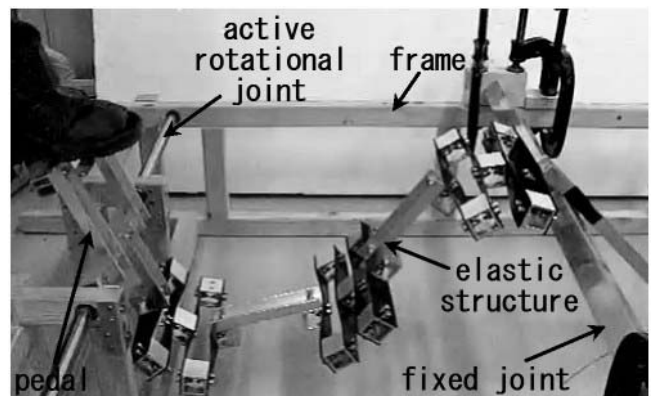


Fig. 3: Prototype of the Impulsive force generator with proposed elastic structure

など、様々なタイプの装置が存在する。しかし、これらの装置では、装置の大型化や重量化あるいは複雑化を招くこと、制御が困難であること、瞬発力の発生に長い時間を要することなどの問題がある。

これに対し、研究代表者は、弾性体の飛び移り座屈を利用した瞬発力発生装置を開発し、コンパクトな跳躍ロボッ

トや走行ロボットへ応用することに成功している。带状弾性体を撓ませ、その両端を固定した上で、一端をゆっくりと回転させると、带状弾性体が、初期形状とは対称な形状に急激に遷移する。この現象は飛び移り座屈と呼ばれ、良く知られた現象であるが、回転モータを使って座屈の発生を制御し、ロボットの瞬発力発生装置として利用した点が新規性であった。この装置は、簡易な構造でありながら、大きな瞬発力を生成可能であるため、力作業アシストへの展開の可能性を秘めていた。

そこで本研究の当初では、飛び移り座屈を利用した瞬発力発生装置の高出力化のために、带状弾性体や増厚化や、弾性体整形という手段を試みた。弾性体整形は、運動を妨げない範囲で、带状弾性体を外部から拘束して複雑な形状を形成し、座屈直前の弾性エネルギーを高める方法である。これらの工夫により一定の成果を得ることができたが、同時に様々な問題が確認された。まず、弾性体整形では、弾性体の占有空間が大きくなり、装置の小型化が困難であった。また、带状弾性体の増厚化では、弾性体の可撓性が損なわれ、飛び移り座屈時に複雑な形状へと遷移する際、弾性体の一部が大きく塑性変形を生じ、複数回の座屈で大幅な性能低下をまねいた。さらには、飛び移り座屈を生じる際の関節の必要駆動角度が大きくなること、瞬発力発生時に関節の回転方向への振り戻しが大きく、所望しない運動に対して弾性エネルギーが消費されることが確認された。すなわち、連続体である带状弾性体の整形および増厚化では、省スペースに瞬発力発生装置の高出力化を実現することができない。高出力化における問題の本質は、弾性体の可撓性を保ったまま、弾性を高められなかったことである。

【研究の内容、成果】

本研究では、弾性構造体 (Fig.1, 2) およびその構造体を利用した瞬発力発生装置 (Fig.3) を開発した。これらの成果物について説明する。さらに、検証実験の結果を示す。

成果物 1：弾性構造体

Fig.1 は、開発した弾性構造体の写真である。Fig.2 は、この弾性構造体を撓ませたときの様子を示した写真である。この弾性構造体は、複数の弾性体と弾性体を直列に結合するための剛体とからなる簡易な構造をもつ。この弾性体は、構造体の長手方向と概ね直交する方向に回転軸を有する振れが可能であり、弾性体の振れによって構造体全体の曲げが生じることを特徴とする。言い換えれば、振りばねの直列構造体である。提案する弾性構造体は、弾性体の

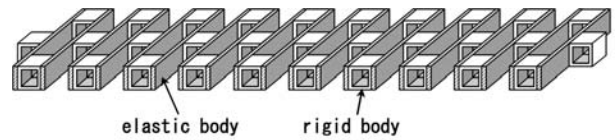


Fig. 4: Proposed elastic structure of perpendicular arrangement type

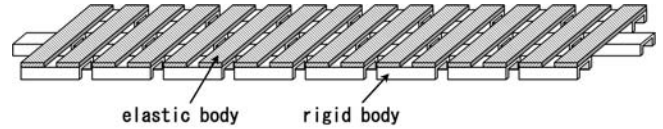


Fig. 5: Proposed elastic structure of parallel arrangement type

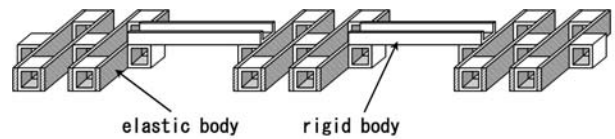


Fig. 6: Heterogeneous elastic structure of perpendicular arrangement type

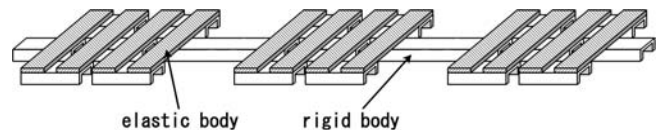


Fig. 7: Heterogeneous elastic structure of parallel arrangement type

振れを利用することにより、可撓性を保ったまま弾性を高めることができる。このため、省スペースに高い弾性エネルギーを蓄積することが可能であり、また、可撓性が確保されていることから、飛び移り座屈を生じさせることができる。Fig.1 に示した弾性構造体は、Fig.4 に示すように弾性構造体の長手方向と弾性体の面の垂線が一致するように弾性体を配置しているが、Fig.5 に示すように弾性構造体の長手方向と弾性体の面の垂線が直交するように弾性体を配置することもできる。前者を“縦置き型”、後者を“横置き型”と呼んでいる。縦置き型弾性構造体は、横置き型と比較して、より省スペースに弾性エネルギーの蓄積が可能であることや、伸縮性を有するなどの特徴をもつ。また、弾性体を長手方向に沿って一定間隔に配置する必要はなく、飛び移り座屈が可能な範囲内で、Fig.6 および Fig.7 に示すように弾性体を不均質に配置しても良い。これらの不均質配置型の構造体では、弾性体の数を減らすことで、軽量化が図れることが利点である。Fig.1 に示した弾性構造体では、後に示すように、座屈直前の形状において、撓みの少ない部分の弾性体を取り除くことにより、軽量化を実現している。

成果物 2：弾性構造体を利用した瞬発力発生装置

Fig.3 は、開発した弾性構造体を利用した新型の瞬発力発生装置のプロトタイプの写真である。このプロトタイプは、撓ませた弾性構造体とその両端に固定した回転関節および固定関節、ペダル、フレームからなる簡易な構造をもつ。このプロトタイプの関節軸間距離は約 530[mm]、高さ 250[mm]、実質幅 280[mm]、弾性構造体長さは約 720[mm] であり、固定関節と構造体間の取り付け角度は $45[^\circ]$ である。この構造体の弾性体には $0.8 \times 34 \times 200[\text{mm}]$ の焼入れリボン鋼 (JIS G4802 SK85-CSP H) の帯片を 2 枚 1 組で用いており、弾性構造体の総質量は、約 2.3[kg] である。また、このプロトタイプの弾性構造体は、6 つのユニットからなる Fig.1 に示した不均質縦置き型弾性構造体である。各ユニットは、2 つの弾性体と、弾性体を直列に結合するアルミ角管およびチャンネルによって構成される。すなわち、この弾性構造体は、1 ユニット当たり 2 自由度、構造体全体としては 12 自由度を有している。

このプロトタイプの回転関節を駆動することにより、弾性構造体の弾性体が捩れを生じ、高い弾性エネルギーが蓄積される。この結果、飛び移り座屈を経て、弾性エネルギーが運動エネルギーに一気に変換され、大きな瞬発力が発生する。Fig.8 は、弾性構造体を利用した瞬発力発生装置の形状遷移図である。この図に示すとおり、飛び移り座屈直前では、弾性構造体は M 字型となり、高い弾性エネルギーが蓄えられる。

また、このプロトタイプは、装置の高さ方向の寸法が 250[mm] とコンパクトであり、人の踏みつけによる回転関節の受動駆動が可能である。そのため、人からエネルギーを取り出すことができ、バッテリー、ガソリン、圧縮空気ポンプなどのエネルギー源が不要である。すなわち、人から無理なくエネルギーを取り出すパッシブな瞬発力発生装置を実現している。もちろん、回転関節をモータなどによって能動的に駆動しても良いが、受動駆動でも動作することで、幅広い範囲の応用が期待できる。

検証実験 1：高弾性と可撓性の両立の検証

提案する弾性構造体と連続弾性体を用い、弾性構造体の高弾性と可撓性の両立の検証を目的とし、たわみ計測実験および座屈試験を行った。たわみ計測では Fig.9 に示すように、長さ 245[mm] の 1 ユニットの弾性構造体および連続弾性体の一端を固定することで片持ち梁状態をつくり、もう一方の自由端の先端に荷重 $F[\text{N}]$ を加えた際の先端のたわみ $\delta[\text{mm}]$ を計測した。たわみ計測の際には、連続弾性体の幅は 100[mm] に固定し、厚さを 0.6, 0.8, 1.0[mm] の三段階に、また、先端に加える荷重 F は約 19.6, 58.9, 98.1[N] の三段階で変化させた。

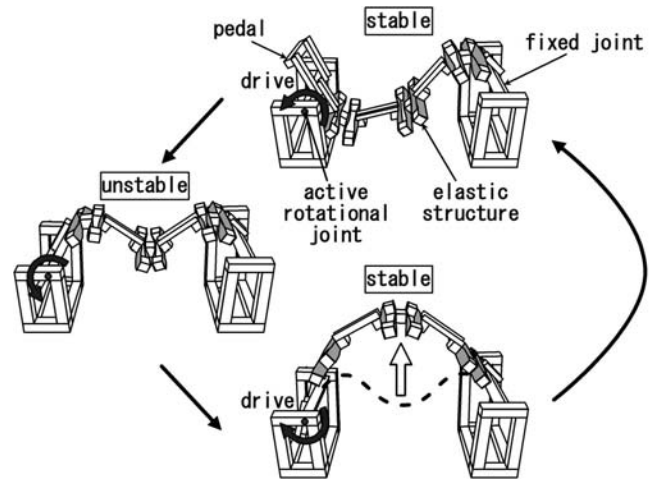


Fig. 8: Impulsive motion by the Impulsive force generator

座屈試験では、弾性構造体と厚さ 0.8[mm]、幅 100[mm]、質量約 0.5[kg] の連続弾性体を瞬発力発生装置に取り付け、複数回飛び移り座屈を生じさせた際の座屈時の塑性変形の有無を調べた。座屈試験における関節軸間距離は約 530[mm]、弾性構造体と連続弾性体の長さは約 720[mm] である。

たわみ計測の結果を Fig.10 に示す。このグラフの縦軸は先端荷重 $F[\text{N}]$ 、横軸はたわみ $\delta[\text{mm}]$ を示している。この結果から、弾性構造体は、厚さ 0.8[mm]、幅 100[mm] の連続弾性体に比べ、高い弾性を有していることが分かった。また、座屈試験の結果、0.8[mm] 厚の連続弾性体は、座屈の際に大きな塑性変形を生じ、数回の飛び移り座屈で大幅な性能低下をまねくことが分かった。一方、弾性構造体は、繰り返し飛び移り座屈を生じさせても性能が低下しないことが確認できた。以上の結果から、弾性構造体は厚さ 0.8[mm]、幅 100[mm] の連続弾性体に比べて高弾性であり、かつ、可撓性が損なわれていないことが分かった。また、1.0[mm] の連続弾性体は、弾性構造体に比べ、高弾性であるが、可撓性が損なわれているため、複雑な形状での座屈が不可能であり、大きな瞬発力を発生することができないことが分かっている。0.6[mm] 厚の連続弾性体では、可撓性は確保されているが、弾性構造体に比べ、低弾性であり、大きな瞬発力を生成できない。この検証により、提案する弾性構造体は、高弾性と可撓性の両立していることが確認できた。

検証実験 2：投擲能力の検証

提案する弾性構造体を利用した瞬発力発生装置のプロトタイプを用い、投擲能力の検証を行った。この実験では、Fig.11 に示すように、弾性構造体上に配置された物体を投擲し、物体の初期位置 $a[\text{m}]$ と投擲後の物体の最高到達

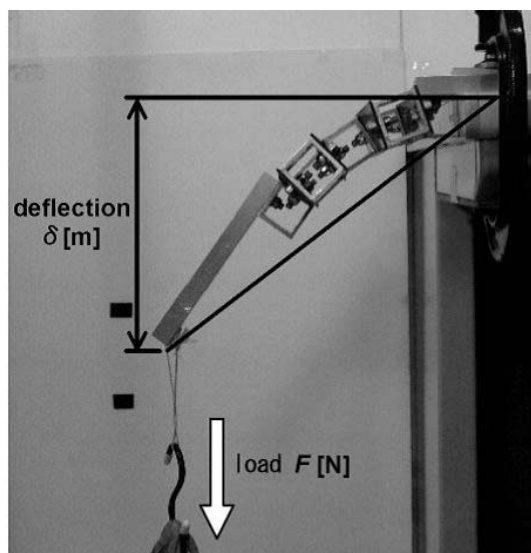


Fig. 9: Measurement of deflection

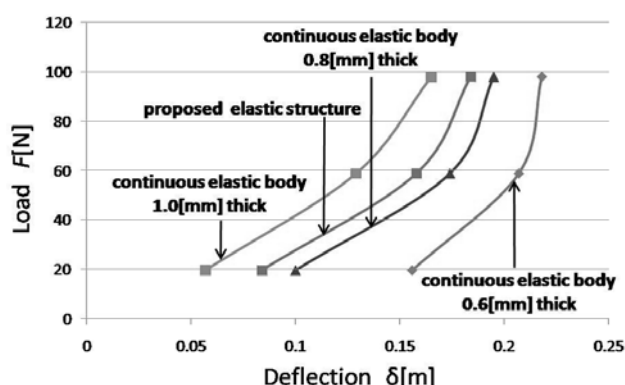


Fig. 10: Elasticity

位置 $b[m]$ の差である投擲高さを計測した。投擲した物体の質量は $1.19[kg]$ である。また、同様にプロトタイプを用い、無負荷時の必要最大駆動トルクを調べた。この実験では、駆動トルクが最大になる飛び移り座屈前の状態において、このプロトタイプのペダルに錘を載せ、力の釣り合い状態を作ることにより、必要最大駆動トルクを求めた。

検証の結果、このプロトタイプは $1.19[kg]$ の物体を約 $2.5[m]$ 投擲可能であり、必要最大駆動トルクは約 $21[Nm]$ であることが分かった。また、必要最大駆動トルクが約 $21[Nm]$ であることから、このプロトタイプでは、人が無理のない踏みつけ荷重で駆動可能であることがわかる。

【今後の研究の方向，課題】

本研究では、弾性構造体およびその弾性構造体を利用した瞬発力発生装置を提案した。提案した弾性構造体は、従来の連続弾性体では実現困難であった、可撓性と高弾性を兼ね備えていることを検証実験により示した。また、提案する弾性構造体を利用した瞬発力発生装置は、人が無理の

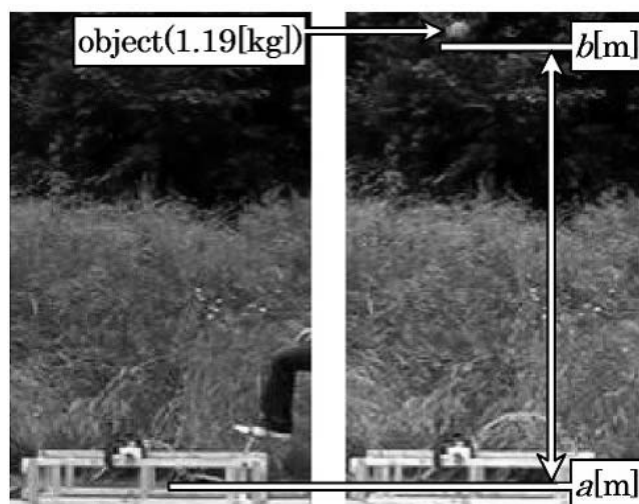


Fig. 11: Height of an object to be thrown

ない踏みつけで出力できる $21[Nm]$ 程度の駆動トルクで、 $1.19[kg]$ の物体を約 $2.5[m]$ の高さまで投擲可能な瞬発力を発生することができることを検証実験により確認した。しかし、提案した弾性構造体および弾性構造体を利用した瞬発力発生装置には、課題も存在する。以下、課題について述べる。

本研究では、イモなどの作物がいっぱい詰められたコンテナを、軽トラックの荷台に乗せる力作業を、目標タスクの一つとして想定している。したがって、 $25[kg]$ 程度の重量物を $1[m]$ 投擲可能な性能を有する、可搬かつコンパクトな力作業アシストデバイスの実現を目指している。このアシストデバイスを実現するためには、弾性体として用いている帯片の増厚、増量、長手方向の寸法変更、軽量化などによる、より一層の瞬発力の高出力化が必要である。また、弾性構造体と投擲物との接触状態は、弾性構造体と投擲物間のエネルギーの伝達に影響を及ぼす。弾性構造体の形状変形とともに投擲物と弾性構造体の接触部が傾斜面となり、投擲物の形状や大きさによっては、弾性構造体上の投擲物が滑りや転がりを生じるため、エネルギーを効率良く伝達できない場合がある。この滑りや転がりは、弾性構造体の接触部形状の変更、あるいは所望の運動を妨げない範囲で滑り止めなどを取り付けることで、その影響を低減できると考えられる。

今後は、更なる高出力化、エネルギー損失の抑制を行い、目標とする力作業アシストデバイスの実現を目指す。

【成果の発表，論文等】

1. 市川泰久，望山洋，藤本英雄：弾性体整形による高出力型閉ループ柔軟カタパルト，第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集，1183/1184，2008.