

受動型球面リンク機構を用いた荷台慣性分離機構 Spherical Dish の試作

Development of a Load Inertia Decoupling Mechanism “Spherical Dish” using Spherical Links

○正 熊谷正朗 (東北学院大)

Masaaki KUMAGAI, Tohoku Gakuin University, kumagai@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

This paper describes a passive mechanism that can decouple inertial influence of additional mass to inverted pendulums or mobile robots. Commonly balance of an inverted pendulum is affected by mass deviation of the body or upper part because equilibrium posture is where center of mass of the whole things comes on ground contact point or based joint, which may be changed by additional mass. To decouple this influence, an idea of mechanism with nature of a pendulum named “Spherical Dish” is introduced, which is implemented by spherical surface and ball transfers, by parallel linkage, and by serial linkage. The experimental results provided in accompanied video show effectiveness of the mechanism.

Key Words: Link mechanism, Parallel link, Spherical motion, Pendulum, Ball riding robot

1 はじめに

著者は玉乗りロボットを発表し、これに荷物を積載して運搬する際の安定性を検討した [1]。この玉乗りロボットは全方位性をもつ車輪移動型倒立振り子であり、駆動にステッピングモータを用いたことで、その操作量を倒立振り子では一般的な力・トルクではなく、加速度・角加速度としており、これが結果的に荷物積載による胴体の慣性パラメータの変動に対してロバスト性に優れることが判明した。ただし、明確な課題として、水平方向での重心(本論文では質量中心を重心と表記する)位置の変更の影響があった。車輪移動型倒立振り子の静的な平衡点は車輪と地面の接点の直上に、車輪を含むすべての共通重心があることである。そのため、追加質量でこの共通重心が移動すると、これが接地点直上となるように機体全体を傾けることになる。一般的倒立振り子制御では、操作側の変位(車輪型では並進)を伴い自然に解消されるが、定常偏差をまねく。上部が何らかの作業をすることを意図して設計されたロボット(たとえば IPentar[2])では、これを考慮した関節の追加や全体の制御方法で解消されるが、不特定の荷物の積載という文脈ではその調整は容易ではない。

この問題の解消には、“静的な重心位置がロボット重心直上に調整できれば良い”と考えた。玉乗りロボット自体は軸対称であり、積載物の重心が水平面でロボットの対称軸上にあればよい。前述の研究ではそうなるように載せていたが、自動調整される方が有用である。また、荷重センサと能動機構による制御よりも受動機構で自然にそうなる構造が望ましい。このことから、試作し検証した方法が図1に示す、球面を持つ皿状の台を複数のボールトランスファで支持した機構である [3]。これは第2節で述べるように球面の球の中心から紐でつられた振り子のような特性を持つため、その中心をロボット対称軸上に配置すれば、皿および皿上に置いた荷重はその中心の鉛直直下となり、ロボットの定常状態ではそれがロボットの中央となる。図1下部の図は錘を乗せたところである。錘が中心まで移動しないのは、皿構造自体の質量のためであり、皿と錘の共通重心が中央に来ている。望む挙動は得られたが、明確な欠点として皿が載っているのみで分離してしまう。そのため、同様な特性、すなわち受動的に球面運動をする機構が他の手段で実現できないかを検討していた。たとえば円弧レールの直動ガイド機構を2本直交配置することなどで実現できそうであるが、実装には至っていなかった。目的は異なるが、1自由度であれば自然振り子式車体傾斜式車両(振り子電車)も振り子を下部機構で実現する例である。

一方、武田はその卒業研究で、自動車車内で使用する、カップに入れた飲料を加減速などでこぼさないドリンクホルダの開発を試みた [4]。上記方法も含め、バネで支持する機構などいくつか試みて最も性能がよいと結論づけたものは、カップを上から紐で吊す方法であった。市販品でも(この効果は明言されていないが)ぶら下げ式のドリンクホルダがあるほか、飲食物配達用の2輪車の岡持を下げるための出前品運搬機(出前機)はサスペンション機構も含むが、上から吊る形態である。ただし、吊すには上部

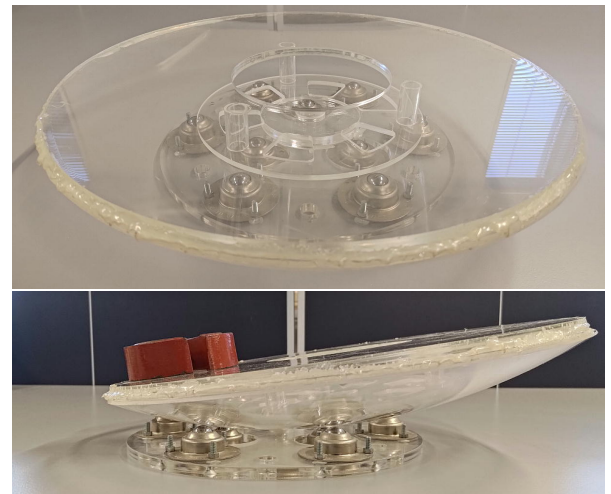


Fig.1 Original idea of the Spherical Dish, a plate with spherical surface put on ball transfers.

に支持構造が必要となり、搬送用の器具としては邪魔である。これを下部構造だけで支えることには優位性があると考えられた。

以上のような手段の要請があるなか、日本精工株式会社 (NSK 社) による検査ロボット用の球面パラレルリンクアクチュエータが発表された [5, 6]。これは心臓超音波検査用のプローブを人体に当てたところを中心として任意の方向に回転させるための3自由度アクチュエータであり、プローブを搭載したエンドエフェクタ部分はその中心に対して球面上を移動する。すなわち、この機構を受動的に使用すれば、以上の課題の解決につながると考えた。

本研究ではこの受動的に球面運動を行う機構を、その当初の形状から、Spherical Dish と称し(以下 SDish と略す)、これを受動リンク機構で実現する手法に関するものである。本稿ではまず、なぜ球面での支持が良いかを示し、ついで、NSK 社の方式を基礎としてパラレルリンクで実装する形態、およびより簡素化した直列リンクで実現する手法について紹介する。

2 Spherical Dish の原理

本節では具体的な機構の前に本手法の基本的な目的を示す。

前述のとおり、玉乗りロボットに荷物を積載するときその重心がロボット軸(ロボットのみでの、本来の接地点と重心を結ぶ軸)からずれると、共通重心が変位することで平衡姿勢が変わることが問題であり、軸上に移動できる手段が期待された(図2)。この解決として、ロボットの軸上でロボット上方に置いた支点から荷物を吊り下げる形とすることを考えた。ロボットが鉛直に制御された状態で(すなわちロボット軸が鉛直)、その支点から下げ

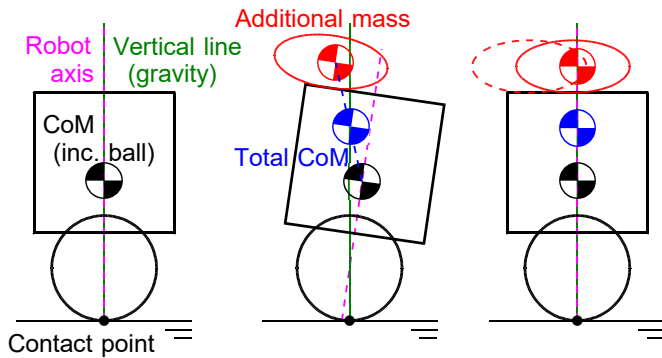


Fig.2 Problem of inverted pendulum with additional mass. The common center of all objects come above the contact point.

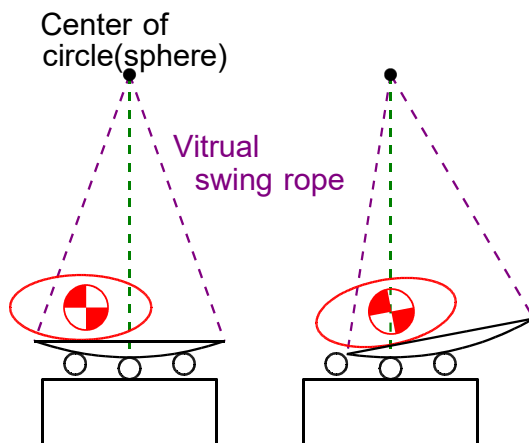


Fig.3 A spherical (cylindrical, circular) surface supported without friction acts as a swinging pendulum.

られた荷物の重心が支点の鉛直下、すなわちロボット軸上にくるため、影響が解消される。荷物の揺動やロボット本体の移動に伴う加減速があると慣性による力も作用するが、支点には力のみ作用し力のモーメントは作用しない。

ただし、ロボット上に吊るための構造を作るとは現実的ではない。すくなくとも、載せる荷物とその揺動する幅の全方向のクリアランスのため、ロボット本体よりかなり広い支持構造が必要となる。その代替として球面（一部）をボールトランスファで支える手段が図3に示すSDishの基本的な案である。ボールトランスファで支持するため、球面に鉛直な支持力しかなく、接線方向には十分に摩擦が減減されている。このとき、球面は（自重で）球中心を拘束されつつ自由に動くが、これは球中心を支点とする振り子の運動（水平方向への運動と旋回の3自由度）と同一である。振り子と異なる点は、球面構造に目立った質量がある点であり、これは荷物の質量と合算される。

ここで、図4に基づいて設計に関わるモデルのパラメータを検討する。主なパラメータは球面（＝振り子）の半径 R と、その想定される最大揺動角 $\Delta\theta$ である。まず、 $\Delta\theta$ 単独では、ロボット本体（倒立振り子）の傾斜角の許容範囲に関わる。すくなくとも、本体が傾いた状態で、振り子が鉛直を中心として揺れる幅が必要である。つぎに、ロボットの加減速による慣性力での傾斜への対応である。本手法を倒立振り子系ロボットに適用する場合は、その加減速ではロボット本体も傾斜することが一般的であるが、本体の傾斜しない一般的な車輪移動ロボットに搭載した場合は、移動の加減速や円弧走行したときの遠心加速度などで振り子が傾く。これも振り子の揺動幅を加味する必要があるが、その中心は $\tan^{-1}(\text{加速度}/(\text{重力加速度}))$ で決定される。

一方、球面の半径 R については、 $\Delta\theta$ の変化に対して、どれだけロボットから水平方向に荷物が変位するか、および積載できるものの高さやその調心のしやすさを決定づける。ロボットに荷物を載せるときは、重心位置がロボットからはみ出すことはない

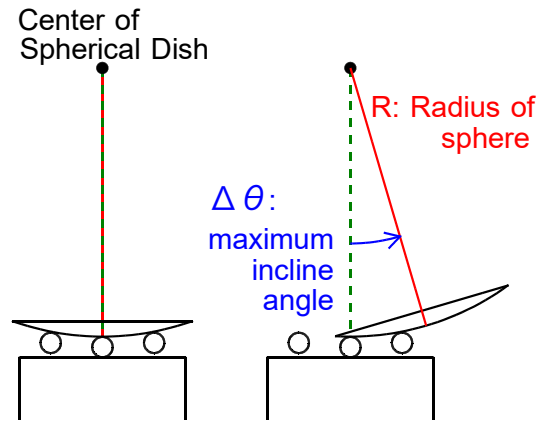


Fig.4 Model parameter of Spherical Dish.

考えられるが、一方でロボットの加減速の場合はこれに応じて傾斜が生じる。最大傾斜時には $R \sin \Delta\theta$ の変位となるが、後述のような機構で支える場合に機構の強度的設計要件となる。この意味では R は小さい方が楽である。これに対して、 R は積載する荷物の大きさを制限する。振り子として機能するには、すくなくとも構造と荷物の重心が中心より下にあることが必要である。それとともに、この重心に作用する重力が調心を行うが、荷物の大きさに対して R を小さくすると重心が高くなり、復元のトルクが小さくなる。これらのことから、 R が本モデルに対して重要なパラメータであるが、その大きさについては用途ごとに検討する必要があるといえる。

なお、倒立振り子の場合は重心高さや制御ゲインと安定性に関係がある。本手法は荷物の荷重を支点位置まで上げてしまうため、それを念頭にしたゲイン調整が必要となる（詳細は略すが姿勢ゲインを高めとする）。

3 パラレルリンクによる Spherical Dish

前述の通り、NSK社の機構に着想をえて、パラレルリンク型のSDishを試作した。図5に水平時と傾斜時を示す。錘（2[kg]）は中央に搭載したので水平を維持するように動作する。動的挙動については定性的な実験結果を付属の動画に収録した。

図6(a)にリンクおよび関節の模式図を示す。下部に底板上で荷重を支える車輪状のベアリングと中央のベアリングからなる底部鉛直軸可動部（J1）、同軸で回転する基部リンク（Link1）に中間リンク（Link2）の接続部（J2）がある。上部の荷物積載部は皿状（Dish）で外周に中間リンクとの接続部（J3）がある。これらを円弧状の中間リンク3本で接続したものである。リンクの関節の回転軸は、すべてこの直上のSDishの支点を通るように設計してある。たとえば、J2まわりにLink2が回転したときに、J3軸はSDishの支点を指し続ける。NSK社の機構は、3系統のリンク列によるパラレルリンクに対して、能動的に3本の最下部リンクを鉛直軸まわりに回転することで、上部エンドエフェクタの姿勢の3自由度を決定する。これに対して、本提案の機構は受動機構であり、エンドエフェクタに相当する上部積載箇所（Dish）でリンクを駆動し、下部リンク（Link1）が回転する。

基本的なリンク構成は同等であるが、設計のパラメータとして、NSK社の機構はエンドエフェクタに搭載したセンサブローブ先端を動かさずに向きだけを変える目的であり、その中心はエンドエフェクタに近い。SDishでは前述のとおり、その半径は用途によって検討するが、相対的には大きくなる。その結果、可動範囲はリンク長に制限されるため、 $\Delta\theta$ は小さめとなる。もう一つの違いとして、この機構は積載物の重力に耐えるだけの強度が必要となり、それを意識した設計が必要となる。そのため、基部リンクの荷重はJ2近傍においた車輪状のベアリングJ1で支える。

設計検討のためのモデルを図7に示す。本機構の特性は中心（支点）に対する角度のみによる。半径は目的や構造的制約に基づいて実設計時に定める。定数は下部関節J2軸の鉛直軸に対してなす角 α 、積載部が水平（Link0の基準に対して平行）のときの上部関節J3の鉛直軸に対する角度 β 、中間リンクの角度 γ である。ここで、機構のモデル化にあたって、一組のリンクのみを考える。また、Link1がZ軸まわりに自由に回転するため、J3が

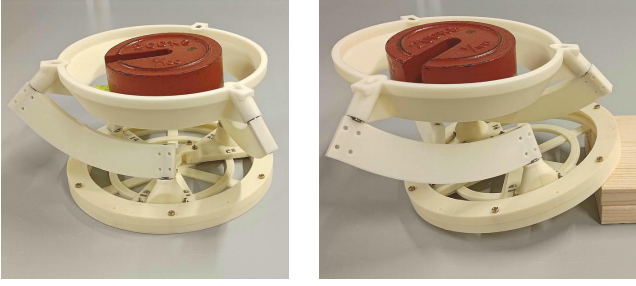


Fig.5 Parallel link type of Spherical Dish.

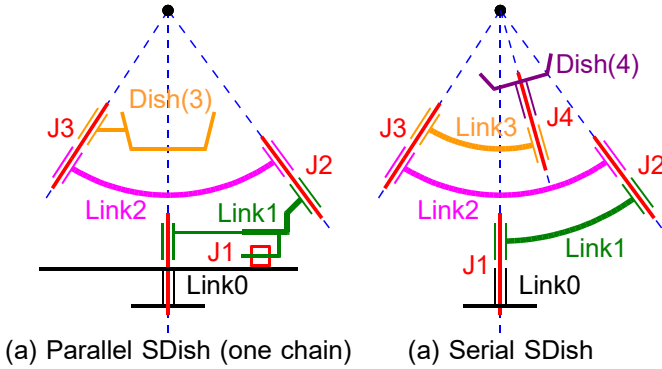


Fig.6 Linkage and joint model of two Spherical Dish.

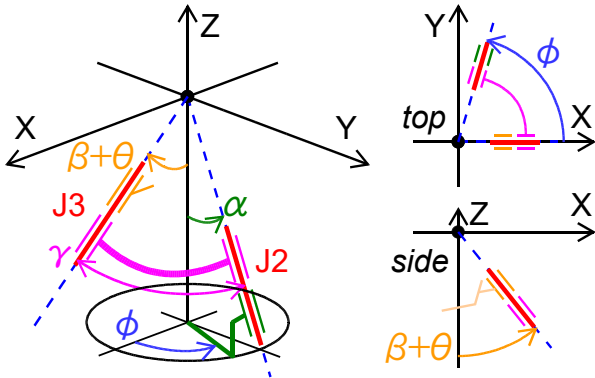


Fig.7 Angular parameter of parallel link type.

ZX 平面にあるように X 軸を定めても一般性を失わない。このとき、変数は積載部の傾きに伴って、J3 が β に加えて (Y 軸まわりに) どれだけ傾いているかを示す θ と、それに伴って Link1 が回転したことによる J2 の XY 平面での方位 ϕ である。

α, β, γ の設定により、積載部をどの程度傾けることができるかを確認し、 α, β, γ の決定法について論じる。前述のとおり、角度のみが意味を持つので、方向ベクトル (単位ベクトル) で考え、 θ と ϕ の関係を導く。

関節 J3 の軸の方向ベクトルは、図より $(\sin(\beta+\theta), 0, -\cos(\beta+\theta))$ であり、J2 は $(\cos \phi \sin \alpha, \sin \phi \sin \alpha, -\cos \alpha)$ である。この内積がなす角 γ の余弦であるため、

$$\sin(\beta+\theta) \cos \phi \sin \alpha + \cos(\beta+\theta) \cos \alpha = \cos \gamma \quad (1)$$

$$\cos \phi = \frac{\cos \gamma - \cos \alpha \cos(\beta+\theta)}{\sin \alpha \sin(\beta+\theta)} \quad (2)$$

よって、 α, β, γ を定めれば、積載部傾き θ に対する Link1, J2 の移動 ϕ が求まる ($\cos \phi$ が ± 1 を超える場合は可動範囲外である)。

各パラメータは以下のような傾向を持つ。 γ は θ の変化幅に対して ϕ が以下の検討のように均等に振るようにするための最終的な調整項である。 α が相対的に大きいと、同じ ϕ の変化に対して J2 の変位が大きくなり、J3 を大きく動かしやすくなるが、Link1 が大型化し、荷重を支える観点から軸への曲げモーメントが大きくなる。 β も荷重の観点では同様だが、積載部の形状を工

夫しなければ、 β が大きくなるほど、支点と積載部が近づく (もしくは“皿”より“井”状になる) ため、あまり大きくはできない。 ϕ は数学的には $0 \sim 180$ [deg] を取れるが、実践的には、なるべく 90 [deg] に近い範囲であるほどよく、 $30 \sim 150$ [deg] が現実的目安である。これは、この機構が増速の性質があり、わずかな摩擦でも可動性に影響するためである。具体的には、本機構は支点に対する重心の傾斜に伴う復元力がリンクを動かすが、重心位置を滑らかに調整するにはリンクを動かす力が課題となる。とくに、 ϕ が 0 または 180 [deg] に近づくと Link1 と 2 が死点 (特異点) の関係となるため、Link2 を介しての力で Link1 が動きにくくなり、また Link2 に対して Link1 が大きく動く必要がある。この観点で、 θ の最大最小に対して、 ϕ が 90 [deg] から同じ幅となるように γ を調整することが、設計指針となった (能動の場合はこの制約無く $0 \sim 180$ [deg] が使える)。

図 5 では $\alpha, \beta, \gamma = 20, 45, 45$ [deg] である。別の試作 (一回り大型で 5 [kg] 超の荷重に耐える) では $20, 35, 37$ [deg] とし、いずれも約 $\theta = \pm 15$ [deg] の実用的な可動域を持つ。後者の方がより下から支え、曲げモーメント負荷の原因となる中間リンクが短めなので本目的には有利と考えられる。

なお、この中間リンクには両端に、支持側と積載側関節から力、モーメントが作用する。準静的には、リンクの自重を除くと力の釣り合いから両者に作用する力は同じ大きさで逆向きである。一方の関節軸に着目して、もう一端に力ベクトル F が作用しているとする。このとき、 F に 2 本の関節軸を含む面に垂直な成分があると、それはリンクを軸まわりに回すことになるため、何らかの動作を伴って、その成分がなくなるところで全体が釣り合うはずである。これはもう一方の軸も同じで、かつ軸は同一平面上にあるため (軸は SDish 支点で交わるため)、 F はこの中間リンクの面内にもみえる。また、モーメントの成分も同様に軸まわりの成分はリンクの自由な回転となるため、結果的にこの中間リンクには、軸の成す面内にしか力、(曲げ) モーメントはない。一方、軸が鉛直軸から斜めであることから、軸部には荷物の重量を超える力が作用する。これらのことから、リンクの形状を定めるとともに、軸受部は曲げモーメントと軸方向加重に耐えるように、ラジアルとスラストベアリングを併用して支持している。

4 直列リンクによる Spherical Dish

以上の平行型から派生して、簡略化した直列リンク型を試作した。これは、図 8 および図 6(b) に示すように、3 節の円弧型のリンク (Link1, 2, 3) と、支持部 (Link0)、積載台 (Dish) からなり、各関節軸は並列型同様に、ラジアルベアリング 2 個とスラストベアリングで支持し、たわみがなければ全ての軸が一点、すなわち SDish 支点で交わるように円弧リンクの形状を設計してある。写真では確認しづらいが、積載台の直下にも関節 (J4) があり、全体で 4 自由度の受動機構である。図 8 では、(a) が無積載の状態、(b) が端に荷重を積載した状態である。これらは平面上に設置することを想定した基部リンクであるが、(c) は手持ちで使えるようにしたグリップであり、(d) は積載台の内部である。各部品 (黒色) は、カーボンファイバ含有のポリカーボネイトフィラメントを FDM 式 3D プリンタで成形した。

この直列リンク型は平行型に比較してよりスムーズな挙動であった。ただし、平行型と比較して、中間リンクの質量分だけ目立って非対称になることが大きな欠点である。平行型も傾くと非対称さはあるが、顕著ではない。そのため、3 次元プリンタで出力したものだけでは、無荷重状態で正しい姿勢をとれず、リンクの質量の影響を受けない程度の荷重を積載すると機能することが確認された。逆に軽量の荷物では機能しないことから、最低限のダミー荷重として (d) に示すように積載台内部に鉛粒をパラフィンで覆い固めた、着脱式の錘をいれてある。そのため、この機構自体がある程度重い。これにより、SDish としての性質が成立した結果が図 (c) であり、持ち手の細い端部だけで自立している。この持ち手の軸の延長上に SDish 支点があり、積載台が支点からぶら下がった状態、すなわち、持ち手の直上に重心がきているので、その接地面だけで倒れずに支持できている。

この直列リンク型の SDish について、定量的な評価は行っていないが、定性的な評価は付属の映像に収録した。実験は大きく二つあり、ひとつは積載台に水を入れた紙コップを乗せ、全体を机上で水平方向に加速する試験である。武田が振り子にすればこ



(a) Without weight



(b) With weight



(c) Hand-held type



(d) Inside of dish

Fig.8 Serial link type of Spherical Dish.

ばれにくいと示したとおり [4], リンク機構で振り子の挙動を再現できたことから, 加速度への耐性を獲得したといえる. 逆に, 自然に揺れている積載台を手で止めると水面が波立つ. 比較として, 同様の加速度でコップだけを机上で動かすと, 水はこぼれた. また, 同様に紙コップを乗せ, グリップを手で保持して様々に揺る実験を行った. これも程度次第ではあるが, こぼさずに済む. 映像には収録していないが, そのまま歩き回っても耐える.

ただし, これらの実験に共通して二つの失敗の傾向があった. ひとつは積載台の上での物品の移動である. 台内の錘とともに振り子運動することが水面を保つ条件になっていて, 台上で横滑りするとその条件からのずれでこぼれやすくなる (落ちることもある). もう一つは, SDish 支点の急激な変動が問題となるケースである. 図 (a)(b) の底が広い支持台でも, 左右への振りが大きくなるとリンク・積載台の慣性の影響でこの範囲で支えられなくなる (ZMP が支持多角形から出ることに対応). この場合, 裏面が部分的に浮き上がり, その揺り戻しで叩き付けられるが, 支持軸の指し示す SDish 支点に大きな揺動や大きな加速度が生じる. また, 図 (c)(d) の手持ち型の場合, 片手で持つと支持しきれずに手首がねじれるように負けたり, 手・腕の剛性と質量で小刻みな振動が発生場合があった. このときも特性は悪化した (映像では両手で持っている). このことから, 実用には支持部を十分な剛性で固定することが不可欠であるといえる.

ここで, 直列リンク型の自由度等の設計パラメータについて論じる. まず, 自由度 (関節数) は最低で 3 必要であることは, 得たい積載台の自由度が 3 であることから自明である. 前述の平行型は, 3 自由度の直列型を 3 本冗長に使用した形とみなせる. 対して, この試作では 4 自由度とした. まず, 最下の支持部と積載台直下に軸を設けた. これはそれぞれの旋回方向の挙動の直接的な絶縁を想定した. たとえば, 下部をロボット等に固定した場合はロボットの旋回で, 手持ちした場合には手の角度変化などでリンクが振り回されないうえに, 支持部の軸は有用である. 積載台直下は積載物の旋回性である. なんらかの外力で回る場合や, 逆にリンク側が動いたことに対して積載物はその慣性で止まろうとする場合は, 台がフリーに回る意義がある. 試作機では, その効果が見られる場合のほか, 微妙なたわみやアンバランスで図 (b) のように偏った位置に置いたときに台が旋回して定常となる場合もある. ここで 2 自由度を使うと, 3 自由度とする場合はあと 1 関節, すなわち中間リンク 2 本の構成となる. 使用状況によってはこれで十分な場合もある (たとえば最下の支持軸が鉛直ではなく, SDish の想定可動範囲外にある場合). 一方で, 図のように, 支持軸が直下にあるような場合に 2 リンクだと, リンク長 (より正確にはリンクの中心角) が等しくなければ, 台が軸の直上に来ることができない. 等しい場合でもそれがリンクの特異姿勢 (死点) となるため, 不適切である. 以上のことから, 中間リンクを 3 本として死点を回避できるようにして, 4 自由度のモデルとなった. その結果, 積載台が望ましい位置に来るためのリンク構成は自由度が余るために無数にあり, その中には中間リンクが重なるケースがある. 自由度的には特異姿勢ではないが, もう一本もほぼ重なる位置にくると特異姿勢に近くなることから動きにスムーズさが無くなって, SDish の性質が損なわれる現象が見られた.

次に, リンク長は, 直列型リンクとして, 全長で可動範囲をカバーできればよい. この機構においては, リンク長に当たるパラメータは各リンクの両端の関節軸のなす中心角 (ともに SDish 支点を通るためその角度) である. たとえば, 図 8 では 1 リンクあたり 20 [deg] で製作したので, 支持部を図のように鉛直に置いた場合は, 鉛直軸から 60 度までが, 積載台の可動範囲 ($\Delta\theta$) となる. 一方, 手持ち型で, この軸が鉛直から 40 度傾いた状態で保持すると, 最も遠いところでは $(60 - 40 = 20)$ [deg] までしか, 届かない. そのため, リンク長の設計は基部をどのように保持するかと, SDish の可動範囲 $\Delta\theta$ を考慮して決定することになる.

最後に, 平行型と直列型を比較する. 一般的なマニピュレータで論じられる平行型と直列型の特性はほぼ当てはまる. たとえば, 平行型は剛性の高さ (耐荷重) が期待される一方で可動範囲を取りにくく, 直列型は可動範囲を得やすいが剛性に注意が必要である. ただし, 本機構は受動機構であるため, マニピュレータで説明される, 直列型が先端まで駆動系があることに対して, 平行型はエンドエフェクタが軽量で高速化しやすい, という特性はほぼ関係ない. 一方で, 上記の平行型の可動性への留意, 直列型のリンク質量によるアンバランスの課題は, この機構ゆえといえる.

5 おわりに

本稿では, ロボット等にもものを積載するときに有用な振り子型特性を実現する Spherical Dish (SDish) について述べるとともに, オリジナルの SDish の欠点を解消するための機構の試作と評価を行った. 既存の機構に着想を得た平行型, そこから派生した直列型とも, リンク機構で SDish を実現することができた. 冒頭に述べたような目的の他, 協調搬送時の支持にも有用と考えられる. 今後, 加振台などを用いて定量評価をすることを計画しており, 振り子との共振特性の比較, 関節部などにダンピングの要素を追加することで, SDish としての特性を損なうことなく, 揺れ続けるという課題を解決できるか (単なる振り子と比較して本機構は可能性がある), などを引き続き検討したい.

参考文献

- [1] Masaaki Kumagai, Takaya Ochiai, “Development of a Robot Balanced on a Ball - First Report, Implementation of the Robot and Basic Control -”, *J. of Robotics and Mechatronics*, vol.22-3, pp.348-355, 2010
- [2] 佐藤拓磨, 永野健太, Luis Canete, 高橋隆行, “拡張状態オブザーバを用いた車輪型倒立振り子ロボットのマニピュレータ動作時における外乱補償制御の検討”, 計測自動制御学会東北支部研究集会資料, 277-10, 2012
- [3] 落合恭也, “玉乗りロボットに関する研究”, 東北学院大学大学院 2009 年度修士学位論文, 2010
- [4] 武田翔, “こぼれないドリンクホルダーの製作”, 東北学院大学 2021 年度卒業論文, 2022
- [5] 日本精工株式会社, “心臓超音波検査ロボット向け「球面パラレルリンクアクチュエータ」を開発 (プレスリリース)”, <https://www.nsk.com/jp/company/news/2021/1110a.html>, 2021, (2024/3 閲覧)
- [6] 日本精工株式会社, “パラレルリンク機構”, 特許第 7222447 号, 2023