

カウンターウェイト位置の自動調節機能を備えた重力補償システムの開発

今岡 広一, 伊藤 壮生, 浦池 隆文, 林 峻輔

Development of the Gravity Compensation System with Automatic Adjustment of Counterweight Position

Koichi IMAOKA, Soki ITO, Takafumi URAIKE, Shunsuke HAYASHI

抄 録

農業における重量野菜の収穫・運搬作業や、工場での重量物運搬作業は作業者の大きな負担となっており、様々な運搬補助装置が開発されている。しかし、既存の運搬補助装置は運搬前に対象物の重量を測定し、その重量に合わせて機構を調整する必要があるため、重量のばらつきが多い農水産物などの場合、運搬のたびに機構調整時間が必要になるといった課題がある。

そこで本研究では、機構調整時間が短い運搬補助装置の開発を目的として、基礎的な技術開発に取り組んだ。カウンターウェイト式の重力補償機構をベースとして、運搬物の重量に応じてカウンターウェイト位置を自動制御することで事前の重量測定や機構の手動調整を行うことなく、任意の重量を補償可能な技術を開発した。さらに、シミュレーションによる検討及び試作した実機による操作感評価により、容易に運搬物を持ち上げることができることを確認した。なお、カウンターウェイト式の重力補償機構には可搬重量の増加に比例してカウンターウェイト部が大型化することが課題である。この課題の解決策としてバネ式の重力補償機構との組み合わせによる改良案を考案した。

キーワード：重力補償, 自重補償, カウンターウェイト, 軽労化

Abstract

Carrying of heavy vegetables in agriculture and heavy items in factories is a one of the major burdens for workers. Various lift assist devices have been developed to solve this problem. However, existing lift assist devices require time to measure the payload weight before transporting it, and to adjust the mechanism to match the weight.

In order to reduce the adjustment time as much as possible, we conducted a basic study by using counterweight type gravity compensation mechanism in this report. We developed a technology that can compensate for any weight by control of the counterweight position automatically without measuring the weight and adjusting the mechanism manually. From numerical simulations and evaluation experiments of operation feeling, it was confirmed that the counterweight and the payload are balanced and the payload can be lifted easily. In addition, the counterweight type gravity compensation mechanism has the problem that the counterweight part becomes larger in proportion to the increase in the load capacity. As a solution to this problem, we propose an improvement by combining it with a spring type gravity compensation mechanism.

KEY-WORDS : Gravity Compensation Mechanism, Self-weight Compensation, Counterweight, Labor-Saving

1. はじめに

農作業などの現場では、重量物運搬が作業者の大きな負担の一つとなっている。運搬作業の省力化（軽労化）のために、アシストスーツや、軽トラックの荷台に装着可能な電動クレーンなどが実用化されている。

しかし、一般的なアシストスーツは装着したままで、自動車の運転など、他の作業を行うことが困難である。また、電動クレーンは、人力での運搬が困難な対象に対しては、絶大な効果を発揮するが、かぼちゃんなどの人力でも運搬可能な重量物を軽トラックの荷台に積載する場合など、電動クレーンを用いずに人力で積み下ろしの方が作業時間が短い事から、使用されない事が多い。

そのほか、運搬物の重量をセンサーで感知し、モーターなどで補助するシステムも存在するが、空圧源が必要であったり、運搬前に運搬物の重量を測定し、重量に合わせて機構を調整する時間が必要となるため、重量のばらつきが大きい農水産物などの運搬では一回の運搬ごとに調整時間が必要となる。そのため、電動クレーンと同様に農作業現場では活用されていない。

そこで、本研究では次章で説明する重力補償機構に着目し、アシストスーツのように特別な操作をすることなく直感的に使用が可能であり、電動クレーンのように軽トラックの荷台などに設置できる運搬補助装置の開発を目的として基礎的な検討を行った。カウンターウェイト式の重力補償機構をベースとして、運搬物とカウンターウェイトのモーメントがつり合うようにカウンターウェイト位置を自動調整する制御を組み込むことにより、運搬物の事前の重量測定や重量に合わせた手動調整を行うことなく、任意の重量の運搬物の重量を補償可能な技術を開発したので報告する。

また、本研究のベースとなるカウンターウェイト式の重力補償機構には、可搬重量の増加に比例してカウンターウェイト部が大型化するという課題がある。既存のバネ式重力補償機構と本研究で提案する重力補償機構を組み合わせることで、この課題を解決する改良案についてもあわせて報告する。

2. 重力補償機構の種類

重力補償機構とは、対象物の重量をおもりなどで相殺する機構であり、運搬作業の補助などを行うために用いられる。

作業者の運搬補助以外にも、産業用多関節ロボットなどにおいて高出力のアクチュエーターを用いずに可搬重量を増加させるために関節部に重力補償機構が利用されるなど、応用先の広い技術である。

近年、重力補償機構はさまざまな種類のもが開発されているが^{1,2)}、最も古くからよく用いられている仕組みは次の2方式である³⁾。

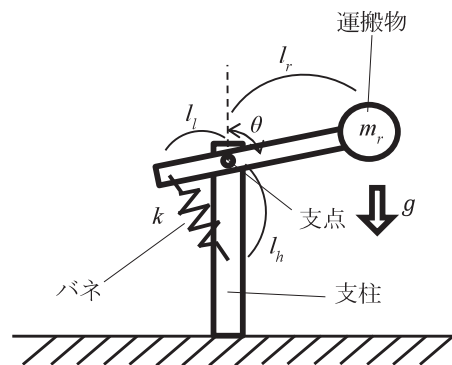


図1 バネ式重力補償機構の例

2.1 バネ式

対象物の重量をバネ力によって相殺する仕組みであり、最も用いられている方式の一つである。

図1に、バネ式の重力補償機構の一例を示す。運搬対象物の重量を m_r 、支点から運搬対象物までの腕の長さを l_r 、支点からバネの固定点までの腕部の長さを l_h 、支点から支柱のバネ固定点までの長さを l_s とし、バネ定数を k 、バネの自然長を l_s 、バネの伸びを l_e 、腕の角度を θ 、重力加速度を g とする。リンクの質量を無視できるとすると、支点まわりの運搬物によるモーメントは

$$m_r \times g \times l_r \times \sin\theta \quad (1)$$

で表される。同様に、バネによる支点まわりのモーメントは

$$k \times l_e \times \frac{l_h \times \sin\theta}{l_s + l_e} \times l_i \quad (2)$$

となり、バネの伸び l_e が次式を満足するとき両者はつり合う。

$$m_r \times g \times l_r = k \times l_e \times \frac{l_h}{l_s + l_e} \times l_i \quad (3)$$

バネ式の重力補償機構はコンパクトな設計が可能であり、次項で説明するカウンターウェイト式と比較して可搬重量が増加しても装置の重量が増加しにくいといったメリットがある。

一方、デメリットとして式(3)に示されるように、通常の線形バネで支柱部と腕部をつないだ場合、バネの伸びが特定の値の場合にしか釣り合わないため、左右のモーメントを常に等しくするためには、zero-free-lengthバネと呼ばれる、バ

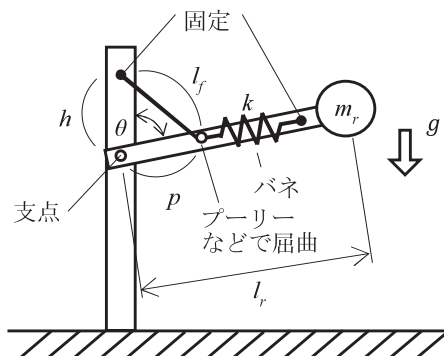


図2 森田らが考案した重力補償機構

ネの全長と弾性力が比例する特殊なバネが必要となることなどがあげられる。

このデメリット解消のため、線形バネと非円形プーリーを組み合わせた方法などが考案されている⁴⁾。

なかでも、森田らが考案した方法は、通常の線形バネのみを使ったシンプルな方法ながら、容易にzero-free-lengthバネと同様の効果を実現可能としている^{5,6)}。

図2に森田らの考案した重力補償機構を示す。バネの一端を腕部に固定し、もう一方の端部にワイヤーなどを取り付け、プーリーなどを介して支柱に取り付ける。運搬対象物の重量を m_r 、支点から運搬対象物までの腕の長さを l_r 、バネ定数を k 、バネの伸びを l_e 、腕の角度を θ 、重力加速度を g とし、ワイヤーの固定点から支点までの支柱長さを h 、プーリーから支点までの距離を p 、プーリーからワイヤー固定点までの長さを l_f とすると、この時、装置先端の運搬物によるモーメントは、図1の単純なバネ式と同じく式(1)で表される。同様に、バネによるモーメントも式(2)と同じ形の以下の式となる。

$$k \times l_e \times \frac{h \times \sin \theta}{l_f} \times p \quad (4)$$

ここで、バネの伸び l_e が l_f と等しくなるようにワイヤーの長さを設計すると、式(4)は以下のように書き換えられる。

$$k \times h \times \sin \theta \times p$$

ここで、おもりによるモーメントとバネによるモーメントがつり合うためには、次式を満足させる必要がある。

$$k \times h \times p = m_r \times g \times l_r \quad (5)$$

つまり、バネ定数 k が

$$k = \frac{m_r \times g \times l_r}{h \times p}$$

となるバネを用いることにより、腕部の角度によらずに重力補償が可能となる。

2.2 カウンターウェイト式

つぎに、もう一つの主流な仕組みであるカウンターウェイト式の重力補償機構について説明する。

図3にカウンターウェイト式の重力補償機構の例を示す。天秤のように、腕部の両側の運搬物とカウンターウェイトのモーメントがつりあう仕組みである。ここで、次式が成り立つ場合に両側のモーメントがつり合う。

$$m_r \times l_r = m_i \times l_i \quad (6)$$

m_r 、 m_i 、 l_r 、 l_i はそれぞれ、運搬対象物の重量、カウンターウェイトの重量、支点から運搬対象物までの腕の長さ、支点からカウンターウェイトまでの腕の長さである。

カウンターウェイト式の重力補償機構には、腕部の重量及び慣性モーメントの増加や、カウンターウェイトが操作の妨げになるといったデメリットがある。特に、可搬重量を増加させるとこれらの欠点は顕著になる。しかし、カウンターウ

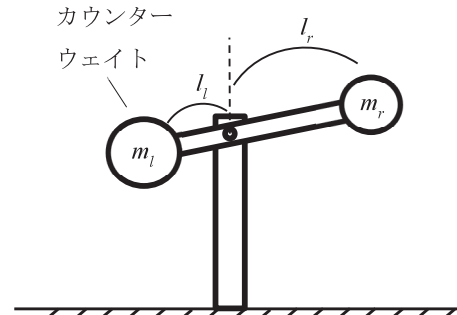


図3 カウンターウェイト式重力補償機構

イト方式の原理は非常にシンプルであり、単純な線形バネ式の重力補償機構とは異なり、腕の角度によらずバランスが取れるというメリットや、支柱の根元に大きなモーメントがかからないというメリットがある。また運搬物の重量 m_r が変わった場合、腕部上のカウンターウェイト位置 l_i を移動させるだけで、任意の重さの重量物を補償可能である。

2.3 任意荷重に対する重力補償

以上のような代表的な重力補償機構は、単一の重量の場合のみ補償可能であり、補償対象の重量が異なる場合には、バネ力の調整やカウンターウェイトの位置・重量の調整が必要である。

この問題を解決するため、木村らはロードセルを用いて補償対象の重量を測定し、その重量に応じてバネ力を自動調整する制御機構を備えた重力補償機構を考案し、人の腕部のリハビリ補助器具などに適用している⁷⁾。また、森田らは、運搬物積載部にバネを内蔵し、このバネのたわみにより自動的に重力補償機構内のバネ力が調整される仕組みを考案し、任意荷重を補償可能な完全機械式の重力補償機構を発明している^{8,9)}。

しかし、これらの任意荷重を補償可能な重力補償機構は、運搬物の重量測定時や、積載時に各関節部を一度固定しなければならない。そのため、野菜など重量にばらつきのある物を連続的に運搬する用途には適していない。

3. カウンターウェイト式の任意荷重補償システムの提案

そこで、本研究では運搬対象物の積載時に関節部を固定することなく、任意荷重を補償可能な重力補償システムの検討を行った。

2.2節で述べたように、カウンターウェイト式の重力補償機構はカウンターウェイト位置を変えるだけで任意荷重に対応可能であるため、これをベースとしてカウンターウェイト位置を自動で調節可能な重力補償システムを考案した。

図4に考案した重力補償システムを示す。また、表1に諸元を示す。本システムは天秤のように支点回りのモーメント

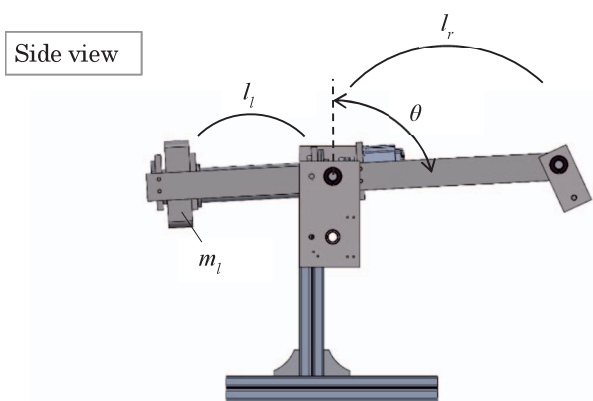
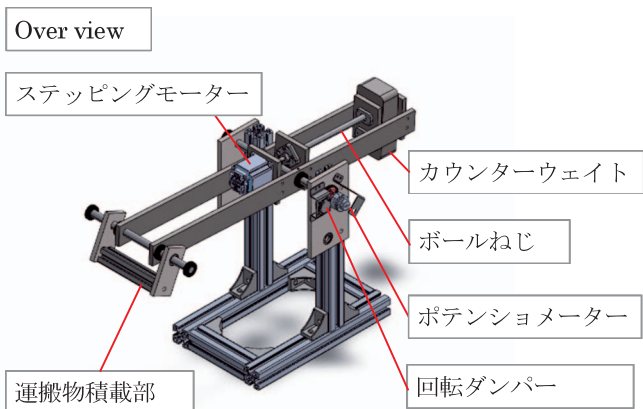


図4 提案する重力補償機構

のつり合いをとるカウンターウェイト方式のシステムとなっており、アームの先端に積載した運搬物とカウンターウェイトがつり合うことで、操作者が重量を感じることなく運搬物を持ち上げることが可能である。

カウンターウェイトは、ステッピングモーターに取り付けられたボールねじにより前後に移動可能である。アームの角度をポテンシオメーターで計測し、この角度を元にマイコンによってステッピングモーターを制御する。

カウンターウェイト位置の制御手法について述べる。本制御は補償モードと運搬モードの2つのモードからなっており、スイッチ操作により切り替えを行う。補償モードではマイコ

表1 提案する重力補償機構の諸元

装置重量 [kg]	20.7
全長 [m]	0.71
全幅 [m]	0.33
支点高さ [m]	0.74
運搬物積載部から支点までの長さ l_r [m]	0.37
カウンターウェイトの支点からの最大距離 l_i [m]	0.26
カウンターウェイト重量 m_i [kg]	3.45
回転ダンパーの最小必要トルク [mN・m]	150

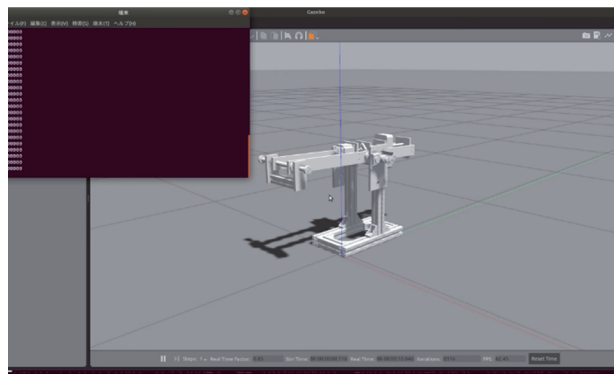


図5 シミュレーションの様子

ンによってアームの角度を常に監視し、支点まわりのモーメントのつり合いが取れ、アームが動かなくなるようカウンターウェイト位置を調整する。一方、運搬モードではカウンターウェイトは動かなくなり、調整後の位置に固定される。どちらの制御時にもアームの固定などは行わない。

操作者はまず装置先端に運搬物を積載し、スイッチを補償モードに切り替える。これにより、カウンターウェイトが装置後方のアーム端に移動をし、運搬物が持ち上がる。運搬物が地面から離れると、モーメントのつり合いが取れるようカウンターウェイト位置を制御する。ここで、運搬モードにスイッチを切り替えるとモーメントがつり合っているため、操作者はほとんど重さを感じることなく運搬物を持ち上げることが可能となる。

上記の制御について、ロボット開発用プラットフォームであるROS及びシミュレーターGAZEBOを用いて、シミュレーションを行った。運搬物搭載部に荷重を加えると、モーメントのつり合いが取れるよう、カウンターウェイトが移動することを確認した。図5にGAZEBOによるシミュレーションの様子を示す。

4. 評価試験

つぎに、シミュレーションを基に提案したシステムを試作し、評価試験を行った。試験の様子を図6に示す。運搬物が地面に接地した状態から、重力補償システムを稼働させた(図6①)。補償モードでは、カウンターウェイトが徐々に後方のアーム端へ移動し(図6②)、運搬物が地面から離れた瞬間にカウンターウェイトが停止し(図6③)運搬物とカウンターウェイトがつり合うことを確認した(図6④)。

カウンターウェイトが停止したことを確認し、スイッチを運搬モードに切り替えた(図6⑤)。カウンターウェイトと運搬物がつりあっているため、重量を感じることなく運搬物を持ち上げられることを確認した(図6⑥~⑧)。

最後に、720gの運搬物を積載した状態で運搬物を持ち上げるために必要な力をアームの角度ごとに比較した。

測定の様子を図7に示す。つり合った状態の重力補償装置

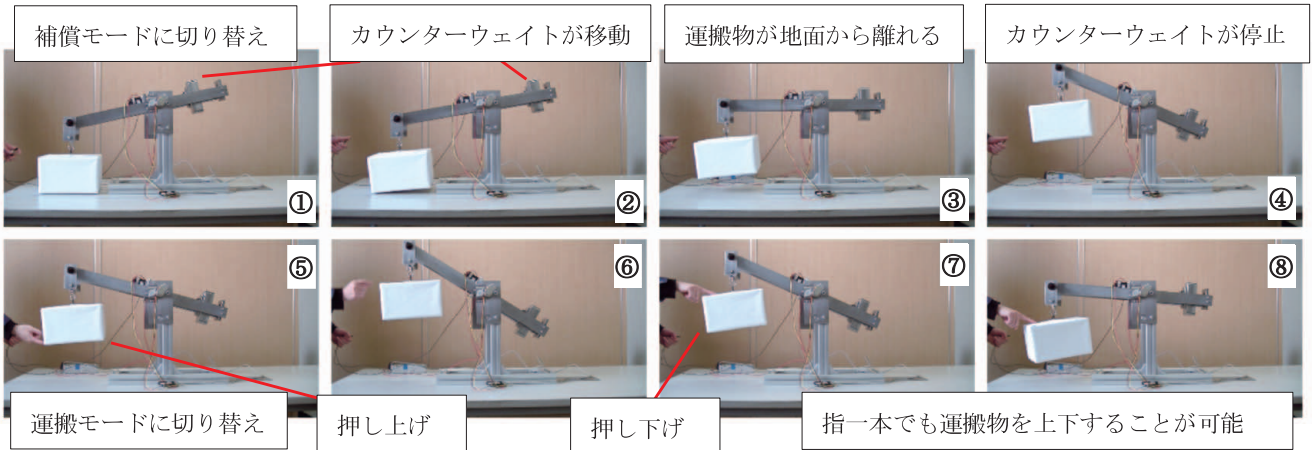


図6 実験の様子（左上から右上，左下，右下の順）

について，アームを特定の角度にして，運搬物積載部を真下からフォースゲージで押し上げ，アームが動いた時の荷重を測定した。アームの角度と補償荷重（運搬物の重量及びフォースゲージ荷重）の関係を図8に示す。アーム角度 θ が50deg~100degの範囲において，補償荷重はほぼ理論値と一致しており，重力補償が正常に作用していることを確認した。

5. 可搬重量の増加を可能とする改良案の考案

カウンターウェイト式の重力補償機構の欠点の一つとして，2章であげたようにカウンターウェイトの大きさの問題がある。可搬重量を増加させる場合，カウンターウェイトを重くするか，支点からカウンターウェイトまでの後方部の長さを長くしなければならない。後方部が短くコンパクトになると取り回しが良くなり，カウンターウェイト式の重力補償機構の活用の幅が広がると予想される。

この課題の解決のために，本研究のカウンターウェイト式の重力補償システムと2.1節で紹介した森田らの重力補償機構^{5,6)}とを組み合わせることを考える。

図9に両者を組み合わせた改良案を示す。森田らの機械式自重補償装置の腕部に移動可能なカウンターウェイトを取り

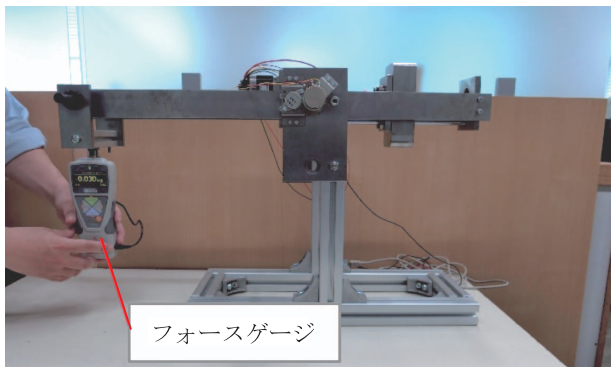


図7 フォースゲージによる最小動作荷重の測定の様子 ($\theta = 90\text{deg}$)

付け，運搬物を積載しない状態で，カウンターウェイトを装置の先端（運搬物積載部と同じ位置）に移動させる。つぎに，バネとカウンターウェイトによりモーメントが釣り合うようバネ定数やワイヤーの固定位置を選択すると，式(5)より次式が成り立つ。

$$k \times h \times p = m_i \times g \times l_r$$

この装置の先端にさらに補償したい重さ m_r の対象物を吊り下げ，カウンターウェイトを位置 x に動かすことを考えると，上式は次のように書き換えられる。

$$k \times h \times p = (m_r \times l_r + m_i \times x)g$$

上の2式の左辺は等しいことより，

$$x = \frac{m_i - m_r}{m_i} \times l_r \tag{7}$$

となり，この x を満足する位置にカウンターウェイトを移動させることで補償が可能となる。

この改良案と前章までで提案した重力補償システムを比較する。改良案の最大可搬重量 m_{rmax} は式(7)の x に $-l_i$ を代入した時の m_r であり，

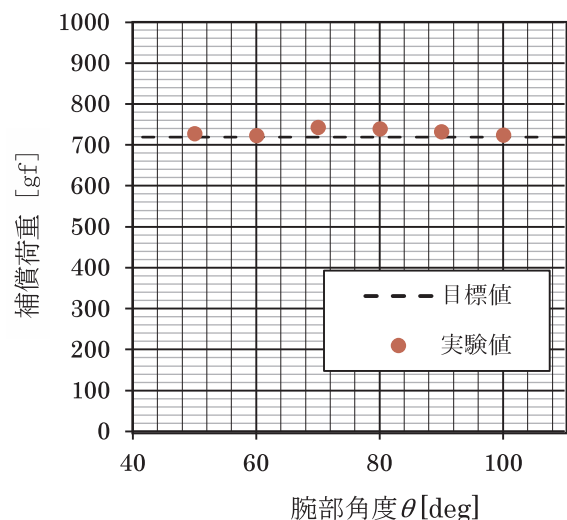


図8

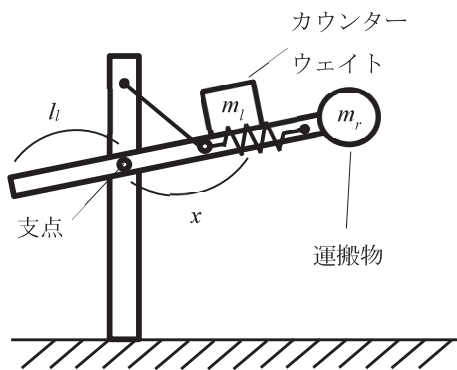


図9 改良案

$$m_{rmax} = m_l \times \frac{l_r + l_l}{l_r}$$

となる。改良前の重力補償システムの最大可搬重量は式(6)より、 $m_l \times \frac{l_l}{l_r}$ であるので、支点前後の腕部長さ l_r , l_l , 及びカウンターウェイト重量 m_l が等しいとすると、本改良により最大可搬重量は $1 + \frac{l_r}{l_l}$ 倍となる。

以上より、支点後方の部分を大型化せずに可搬重量を増加させることが可能となり、本システムの様々な分野での活用が期待できる。

6. おわりに

本研究では、重量のばらつきが大きい重量物を運搬する際の作業者の負荷軽減を目的としたカウンターウェイト方式の重力補償システムを設計・試作した。

カウンターウェイト位置を自動調整する制御を組み込むことで、運搬物の事前の重量測定や重量に合わせた手動調整を行うことなく、任意の重量の運搬物が運搬可能であることを確認した。

また、森田らが考案したバネ式の重力補償機構と本研究で開発したカウンターウェイト式の重力補償システムを組み合わせ、通常のカウンターウェイト式と同じ大きさで可搬重量を増加させる機構の提案を行った。

今後は、この提案した重力補償システムの改良案に対する実機による検証などを行い、実用化を進めていきたい。

本研究で提案した重力補償システムは1リンク構造だが、実用においては運搬の自由度を向上させるため2リンク以上の構造が望ましい。しかし、カウンターウェイト式には、単純に多リンク化した場合、リンクが増える毎に支柱に近いリンクのカウンターウェイトが増大するという課題がある。この課題は先行研究で示されているようなワイヤーなどを用いてカウンターウェイトを支柱側に集約する機構¹⁰⁾などを組み込むことで解決可能と考える。

謝辞

本研究を実施するにあたり、慶應義塾大学 森田寿郎准教授、あいち産業科学技術総合センター 木村宏樹主任研究員には多くのご助言・ご協力を頂きました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 江島源太・武居直行・友延英史・藤本英雄：「ガスピリングによるロボットアームの重力補償」, 第16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 (SI2015)論文集, pp.1490-1492 (2015)
- 2) 山田泰之・森田寿郎：「倍力装置を備えた流体式自重補償装置」, 日本機械学会論文集 (C編) Vol.77, No.779, pp.2576-2585 (2011)
- 3) 武井直行：「省エネ・安全のための重力補償機構」, 日本ロボット学会, Vol. 29, No.6, pp.508-511 (2011)
- 4) 遠藤玄ほか：「非円形プーリ - バネ系による自重補償機構と4節平行リンク型アームへの適用」, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.1, pp.77-84, (2010)
- 5) T. Morita, F. Kuribara, Y. Shiozawa and S. Sugano, "A novel mechanism design for gravity compensation in three dimensional space," Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003), Vol.1, pp.163-168 (2003)
- 6) 森田寿郎・栗原史好・塩澤裕樹・菅野重樹：機械的自重補償装置, 特開 2003-181789 (2003).
- 7) 木村宏樹・酒井昌夫・竹中清人：「ロボット要素技術としての可変自重補償機構 (免荷装置)」, 愛知産業科学技術総合センター研究報告2016, pp.52-55 (2016)
- 8) 山田泰之・長坂 俊・森田寿郎：「機械的荷重補償装置の開発」, 日本機械学会論文集 (C編) Vol.77, No.777, pp.2042-2051 (2011)
- 9) 森田寿郎：「自重補償機構の設計原理と動作支援技術への応用」, バイオメカニズム学会誌, Vol.30, No.4, pp.200-204 (2006)
- 10) S. Hirose, T. Ishii and A. Haishi, "Float arm V: hyper-redundant manipulator with wire-driven weight-compensation mechanism," 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422), Vol.1, pp.368-373 (2003)