

研究論文

ロボット要素技術としての可変自重補償機構(免荷装置)

木村宏樹*¹、酒井昌夫*²、竹中清人*²

Development of Variable Gravity Compensation Mechanism for Robotics Elemental Technology

Hiroki KIMURA*¹, Masao SAKAI*² and Kiyoto TAKENAKA*²Industrial Research Center*^{1,2}

ロボットの本質安全につながる要素技術として、対象物の重量をバネの弾性力で支える（自重補償）機構を提案している。本機構は、形状を工夫したカムにより一定の支持力を発現し、対象物の重量に応じて支持力の調整が可能であることを特徴とする。本研究では、機構の支持荷重特性を評価し、明らかになった支持荷重誤差（非定荷重、ヒステリシス特性）について、その要因と改善方法について考察した。幾何計算に加え数値計算による手法を導入し、理論モデルを再構築すると共に、機構の設計パラメータを最適化することで、支持荷重特性が向上できることを示した。

1. はじめに

自動車部品や家電・情報機器などの生産ラインや医療・介護の現場などにおいて、人とロボットが協調して作業することが期待されている。このような場では法規制による安全確保が重要で、産業用ロボットでは労働安全衛生規則第150条の80W規制の解釈が見直され、生活支援ロボットでは国際安全規格ISO13482が発行されたところである。ロボットの安全方策として、搭載するアクチュエータの低出力化は本質安全につながる。

セル生産方式の普及などにより、人とロボットが協調して作業する工程の構築が期待されている。このような場では、安全面からロボットの低出力化が求められる。しかし、低出力化は作業対象である部品を軽量なものに制限し、ロボットが担える作業を減らすことになる。

この課題を解決する方法の一つとして、作業対象の重量をロボットではなく、別の装置で免荷する方法が考えられる。工場での作業者の負担軽減、作業の効率化を目的として、バルンサーや専用機など対象物の重さを免荷する装置が利用されている。しかし、これらの多くは、単一の重量物のみを免荷することを目的とするものが多く、また、電動式やエア式のアクチュエータを搭載したものである¹⁾。セル生産ラインのように、複数の部品を扱う工程では、それぞれの部品の重量に対して免荷でき、また、安全面から低出力（無動力）であることが求められる。我々の提案する可変自重補償機構は、対象物の重量をバネの弾性力を利用して免荷するもので、形状を工夫したカムを用いることで、対象物を定荷重で支持

するものである。また、簡単な調整により支持力の調整が可能である。これまで機構が満たすべき関係式を明らかにするとともに、異なる重量物に対して支持力の調整が可能であることを幾何計算により示してきた²⁾。図1は、提案する可変自重補償機構を岐阜大学 川崎・毛利研究室が開発する「床上で利用可能なリハビリ支援システム」の腕や機構の重量を免荷する装置に適用した例である（以下、現行機）。現行機では、荷重支持が可能であることを示す一方、支持力に誤差が大きいことが課題として挙げた。

本研究では、現行機の支持荷重特性を評価し、課題である支持力誤差の要因を特定すると共に、提案する可変自重補償機構を要素技術として向上させることを目指す。

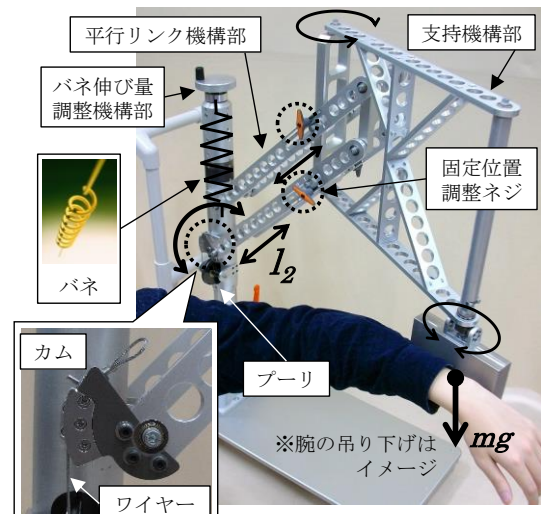


図1 可変自重補償機構（現行機）概観

*¹ 産業技術センター 自動車・機械技術室（現産業労働部 産業振興課） *² 産業技術センター 自動車・機械技術室

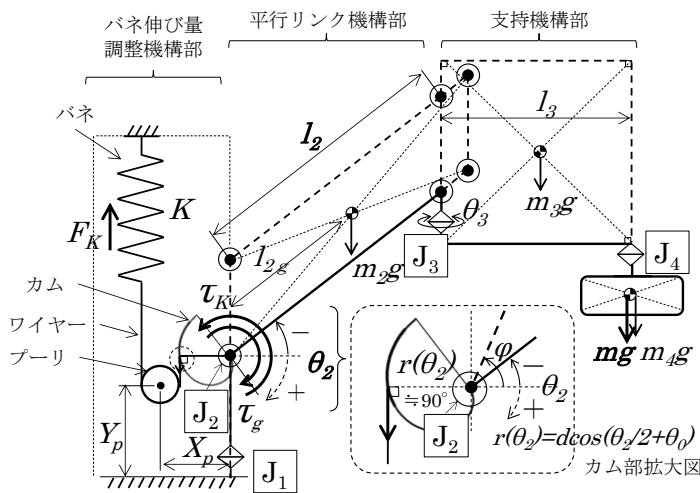


図2 可変自重補償機構のモデル図

2. 可変自重補償機構の原理

可変自重補償機構のモデルを図2に示す。本機構は、対象物を保持する支持機構部と平行リンク機構部、バネ、カムで構成される。支持機構部に荷重が作用すると平行リンク機構部が傾き、カムが回転し、ワイヤーを介して引っ張られるバネの弾性力により対象物を支持する。平行リンク機構部により、支持機構部は常に水平が保たれ、併せてカムの形状を工夫することで、機構の姿勢によらず常に一定の荷重で対象物を支持することができる。固定位置調整ネジにより、平行リンク機構部の位置を調整することで支持荷力の調整が可能である。バネ伸び量調整機構部でバネの初期伸び量を変更でき、支持力の微調整ができる。また、機構の各関節は受動関節であり、対象物の水平・垂直方向の動きを妨げない。

対象物の自重により、関節 J_2 に作用するトルク τ_g (式(1))とバネの弾性力によるトルク τ_K (式(2))が、関節 J_2 の角度 θ_2 に依らず釣り合えば、対象物を常に定荷重で支持する(自重補償)ことができる。式(1)、(2)中の $r(\theta_2)$ はカムの径、 $x(\theta_2)$ はバネの伸び量であり、式(3)、(4)で与えられる。釣り合い条件は、幾何計算により式(5)、(6)のように求められる。

$$\tau_g = \{(m + m_3 + m_4)l_2 + m_2l_{2g}\}g \cos \theta_2 \quad (1)$$

$$\tau_K = K\{x(\theta_2) + x_0 + f_0/K\}r(\theta_2) \quad (2)$$

$$r(\theta_2) = d \cos(\theta_2/2 + \theta_0) \quad (3)$$

$$x(\theta_2) = \int_{-\varphi}^{\theta_2} r(\theta) d\theta \quad (4)$$

$$l_2 = (Kd^2/g - m_2l_{2g})/(m + m_3 + m_4) \quad (5)$$

$$x_0 = 2d \sin(-\varphi/2 + \theta_0) - f_0/K \quad (6)$$

但し、 $\theta_0 = \pi/4$

項目	内容	設計値
m	対象物の質量	1.9[kg]
m_2	平行リンク機構部質量	1.4[kg]
m_3	支持機構部質量	2.0[kg]
m_4	"	4.0[kg]
g	重力加速度	9.8[m/s ²]
l_2	平行リンク機構部長さ	319.5[mm]
l_{2g}	" 重心位置	192.0[mm]
l_3	支持機構部長さ	280.0[mm]
X_p	プーリ位置	37.0[mm]
Y_p	"	75.0[mm]
θ_2	J_2 関節角度	-
d	カム径	45.5[mm]
θ_0	カム角度	45.0[deg]
K	バネ定数	13.5[N/mm]
f_0	バネ初張力	110.1[N]

リンク長さ l_2 、バネの初期伸び量 x_0 が式(5)、(6)を満たす時、自重によるトルク τ_g とバネによるトルク τ_K が釣り合う。また、対象物の自重 m に合わせてリンク長さ l_2 を式(5)に基づき調整することで、支持荷重の調整が可能である。

3. 可変自重補償機構の支持荷重特性

現行機の支持荷重特性を評価するため、支持力の計測を行った。図3に示すように、万能試験機((株)島津製作所 AG-100kNE型)を用いて、機構を引っ張り・戻す(加荷・除荷)サイクル動作を行った。機構の先端にロードセル、ワイヤーを取り付け、プーリを介して万能試験機により定速度で加荷・除荷する。その間のロードセルの出力値をPCに取り込み支持力を計測した。機構の関節角度は、デジタルカメラにより動画撮影をし、高速度カメラシステム(フォトロン(株)HV-W modelA)を用いて関節部に貼付したマーカーをデジタル処理(画像処理)することで計測した。それぞれの測定周期は300msとし、LEDの発光により同期処理をした。

測定結果を図4に示す。測定結果から、設計上得られる理論値と一致せず、目標である定荷重ではなく非定荷重(誤差約2kgf)となっていることが分かった。また、加荷時と除荷時において、支持荷重が一致しないヒステリシス特性があることが分かった。

4. 誤差要因と理論モデルの再構築

非定荷重かつヒステリシス特性を示した要因として、①幾何計算におけるモデルの単純化による影響、②カム形状の誤差による影響、③バネ、ワイヤーの特性に

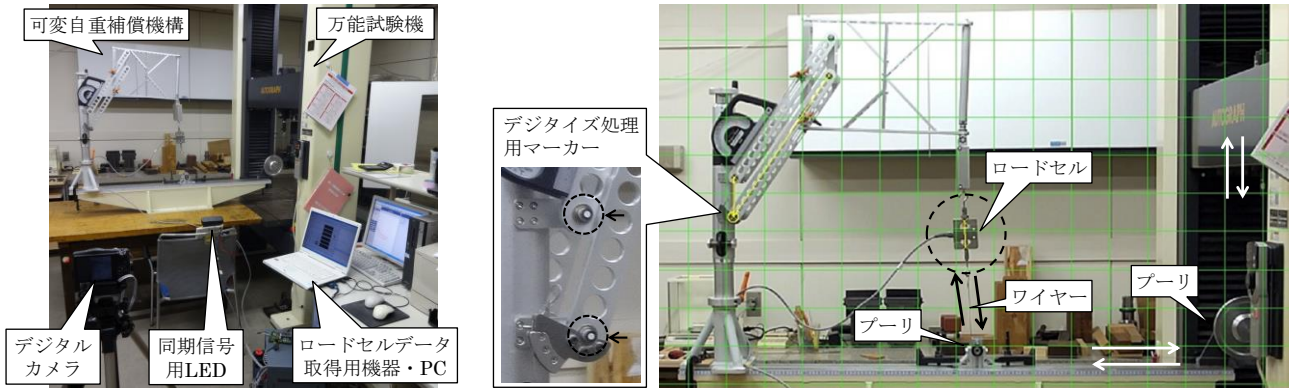


図3 可変自重補償機構の支持荷重測定

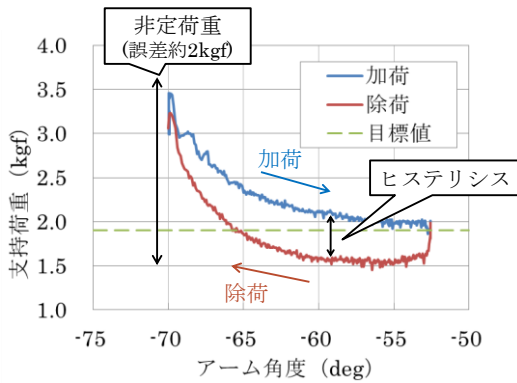


図4 アーム角度と支持荷重特性

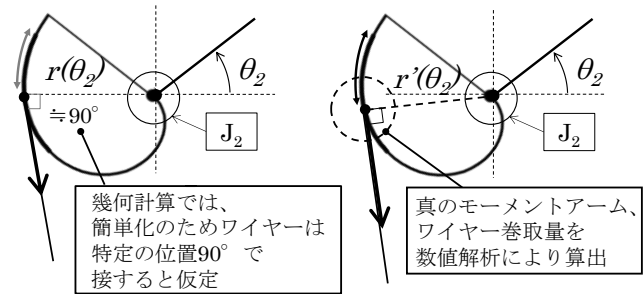


図5 カムとワイヤーの位置関係

よる影響が考えられる。以下、それぞれについて検証する。

4.1 幾何計算の単純化による誤差 (非定荷重)

2章で本機構の原理を紹介し、機構が満たすべき条件を求めた。この際、幾何計算の単純化のため、カムとワイヤーは特定の位置 90° で接すると仮定した。しかし、カムの径は一樣でないため、ワイヤーが接する位置は一意でない。ワイヤーの接点が変われば、ワイヤーの巻取量すなわちバネの伸び量、 J_2 関節中心からの距離であるモーメントアームも変わる。従って、バネによる J_2 関節に作用するトルクの大きさも変わることになる (図5)。そこで、ワイヤーがカムと接する位置を数値解析により厳密に求め、真のモーメントアーム、ワイヤーの巻取量を求めた。

4.2 カム形状による誤差 (非定荷重)

使用したカムは式(3)に基づき設計した。カム形状を三次元測定機で測定し、設計値照合によりその形状誤差を検証した。結果を図6に示す。カムは一部摩耗と考えられる形状崩れがあるものの許容誤差範囲の形状 (輪郭度 500 μ m 以下) となっていることを確認した。

4.3 ワイヤー、バネの特性による誤差 (ヒステリシス)

ヒステリシス特性の要因として、ワイヤーの伸びが疑われるため、引張試験機によりその特性を評価した。

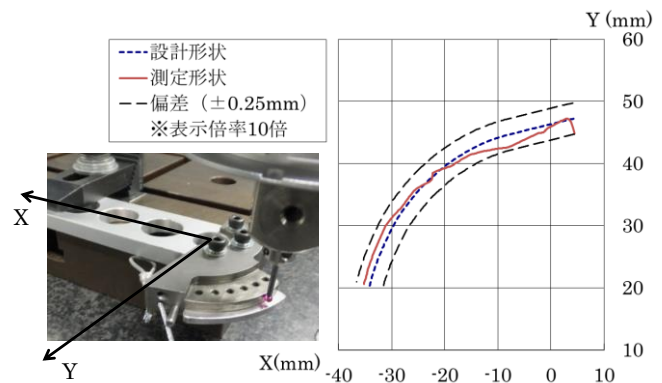


図6 カム形状の測定結果

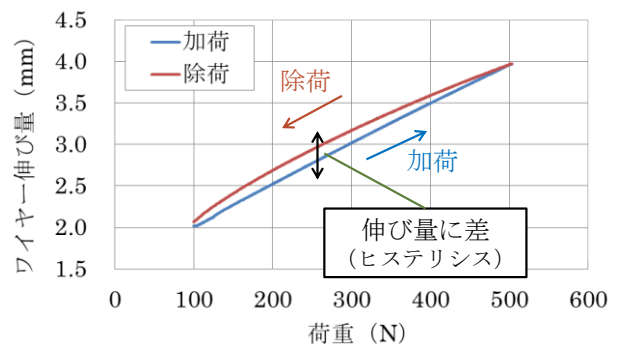


図7 ワイヤーの特性評価 (引張試験)

併せてバネの特性評価も行った。ワイヤーの引張試験結果を図7に示す。ワイヤーの長さは360mmとし、機構に使用しているものと同一にした。荷重を加えることにより、ワイヤーには伸びが生じ、また、除荷の際、加荷時

に生じた伸びが残存し、加荷と除荷において同一荷重を加えても伸び量が異なるヒステリシス特性があることが確認できた。バネについては、ヒステリシス特性は見られず、初張力以上の荷重においては荷重と伸びの関係は、仕様どおり線形であった。

4.4 理論モデルの再構築

現行機の支持荷重誤差は、幾何計算の単純化による誤差とワイヤーのヒステリシス特性が主要な要因と考えられる。そこで、カムとワイヤーの接触位置を数値解析により厳密に求めるとともに、ワイヤーの特性を加荷と除荷に分けてそれぞれ数式化して理論モデルに盛り込んだ。その結果、**図8**に示すように支持荷重は非定荷重となり、加荷と除荷で荷重が異なるヒステリシス特性を示した。**図4**で示した測定値と同様な傾向が確認できた。

5. 最適化計算による設計（誤差低減）

現行機の支持荷重の測定値に生じた誤差について、理論モデルにワイヤーとカムの位置関係とワイヤーの伸びを考慮することで説明することができた。しかし、対象物の自重を補償するためには、支持荷重は定荷重である必要がある。非定荷重となった要因は、カムとワイヤーの接触位置の他に、プーリの位置が影響すると考えられる。そこで、定荷重を実現するため、最適なプーリ位置を求めた。機構の各姿勢（関節角度）における支持荷重誤差の総和を最小とする式(7)を評価関数とし、プーリの位置 (X_p, Y_p) の最適値を求めた。なお、式(7)中の $e_i(\theta)$ ($i=1,2$)は、 J_2 関節角度 θ における加荷、除荷時の支持荷重誤差である。

$$S = \text{Min}[\sum_{\theta} \{e_1(\theta) + e_2(\theta)\}] \quad (7)$$

結果を**図9**に示す。プーリ位置を最適化することで、支持荷重誤差を低減できることが分かる。しかし、ヒステリシス特性により、 $\pm 0.4\text{kgf}$ 程度の誤差が生じた。ヒステリシスの要因はワイヤーの伸びであることから、伸びのない部材を使用したと仮定し、併せて、プーリの位置 (X_p, Y_p) 、カム径 d （リンク長さ l_2 に依存）の設計パラメータを式(7)の評価関数に基づき最適化し、計算した結果を**図10**に示す。このことから、ヒステリシスのないワイヤーを使用することで、定荷重を実現できることが示唆された。

6. 結び

提案する可変自重補償機構について、支持荷重特性を評価し、ヒステリシス・非定荷重特性とその要因を明らかにした。幾何計算に加え数値計算による手法を導入し、理論モデルを再構築すると共に、機構の設計パラメータ

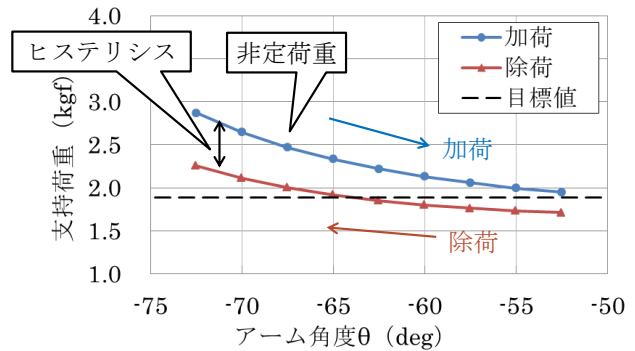


図8 支持荷重の厳密計算結果

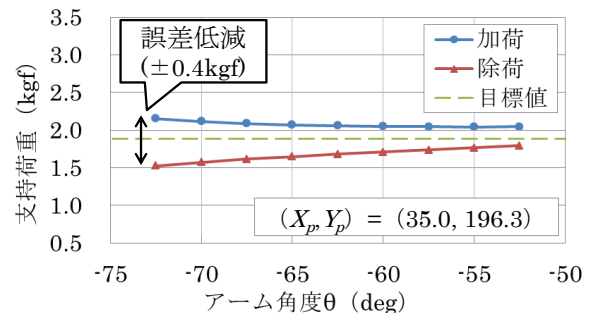


図9 プーリ位置の最適化による支持荷重誤差

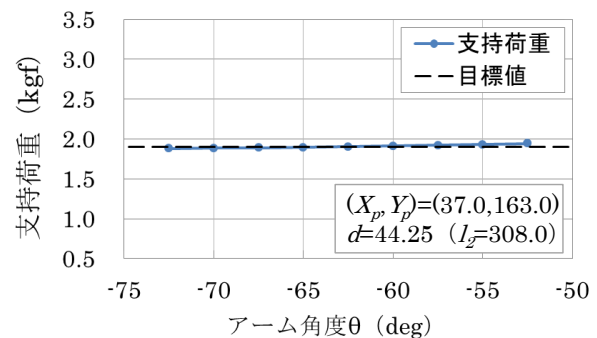


図10 ヒステリシスが無い場合の支持荷重誤差

を最適化することで、支持荷重誤差を低減できる可能性があることを示した。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、機構の支持荷重特性評価のため岐阜大学 川崎・毛利研究室より現行機をお借りしましたこと、川崎特任教授・名誉教授、毛利准教授からご助言いただきましたことに感謝申し上げます。

文献

- 1) 村上英之, 武居直行, 松本邦保, 鴻巣仁司, 藤本英雄: 日本ロボット学会誌, **28**(5), 624-630(2010)
- 2) 木村宏樹, 石樽康彦, 毛利哲也, 川崎晴久, 伊藤聡, 西本裕, 青木隆明: 第23回バイオメカニズムシンポジウム予稿集, 291-297(2013)