

研究論文

人との協働を目的としたスマート・アシスト機の開発 ～ロボット要素技術としての可変自重補償機構～

木村宏樹*1、酒井昌夫*2、竹中清人*2、児玉英也*2、島津達哉*3

Development of Smart Assist Machine for Cooperation with Human -Variable Gravity Compensation Mechanism as Robotics Elemental Technology-

Hiroki KIMURA*1, Masao SAKAI*2, Kiyoto TAKENAKA*2,
Hideya KODAMA*2 and Tatsuya SHIMAZU*3

Industrial Research Center *1~3

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、その支持力を重量に応じて調整することができる方法(可変自重補償機構)を考案した。この可変自重補償機構の実証モデルとして、対象物の重量に応じて支持力を自動調整するスマート・アシスト機を開発した。開発した機構に対し、支持荷重特性を評価した結果、重量変化に対する応答性については改善が必要であるものの、対象物の重量に対して一定荷重の支持力を発現することを確認した。

1. はじめに

製造現場や生活、介護の場などにおいて、人とロボットが協調して作業をすることが期待されている。このような場では安全確保が重要であるため、産業用ロボットは国際安全規格 ISO10218 (JIS B 8433)で、生活支援ロボットは ISO13482 (JIS B 8445)で安全要求事項について規定されているとおり、設計者がリスクアセスメントを実施し、危険源に対するリスクを保護方策により許容可能な水準に低減する必要がある。

例えば、ロボットの出力を低減(搭載するアクチュエータの低出力化)することは、本質安全につながるためリスクを低減する効果的な保護方策である。しかし、産業用ロボットでは、ロボットの出力を低減すると作業対象である部品を軽量なものに制限することになり、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、別の装置で支える(自重補償する)方法が考えられる。

自重補償の方法としては、様々な方法が提案されており¹⁾、バランスャーや専用機などの装置が実際に工業で利用されている²⁾³⁾。これらの多くは、単一の重量物のみを支えることを目的とするもの、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が、多種の部品を扱うセル生産のような場では、部品重量に応じて支持力を調整することができること、安全面から低出力(無動力)であることが求められる。

当センターでは、自重補償の方法について、これまで引張バネとカムを用いて支持力を発現する方法を提案してきた⁴⁾が、幾何計算の単純化による誤差やワイヤーの伸びに起因するヒステリシス特性などの支持荷重誤差が生じる課題があった⁵⁾。本研究では、この課題の解決を狙い、圧縮バネと定荷重バネ、円形のフォロアを用いる新たな方法(可変自重補償機構)を考案し、この可変自重補償機構の実証モデルとして、対象物の重量に応じて支持力を自動調整するスマート・アシスト機を開発した。

本稿では、新たに考案した可変自重補償機構と開発したスマート・アシスト機の概要及びその支持荷重性能の評価結果について報告する。

2. スマート・アシスト機と要素技術としての可変自重補償機構

開発したスマート・アシスト機の外観を図1に、構成と機構モデルを図2、図3に示す。従前の課題である支持荷重誤差の要因であったカムとワイヤーの代わりに円形のフォロアとスライドガイドを用い、広い可動範囲の確保のために引張バネの代わりに圧縮バネ、定荷重バネを用いることで、従来の方と比べて剛性が高まり、支持荷重特性の向上が期待できる。具体的には、図2に示すとおりで、スマート・アシスト機の可変自重補償機構は、リンクとフォロア、スライドガイド、圧縮バネ、定荷重バネ、サーボモータで構成される。平行リンクアー

*1 産業技術センター 自動車・機械技術室(現産業労働部 産業振興課次世代産業室) *2 産業技術センター 自動車・機械技術室 *3 産業技術センター 自動車・機械技術室(現総合技術支援・人材育成室)

ムの先端に荷重 (Mg)が作用するとアームが傾き、連結されたフォロア①がスライドガイド①を押し上げ、定荷重バネ①を引張り、併せて圧縮バネを圧縮する。同時にもう一方のフォロア②が、アームの傾斜角度に対し、歯

車を介して2倍の角度回転し、スライドガイド②を押し上げ、定荷重バネ②を引張る。対象物の重量によりアームの回転軸に作用するトルク τ_g と定荷重バネと圧縮バネの弾性力によるアームの回転軸に生じるトルク τ_K

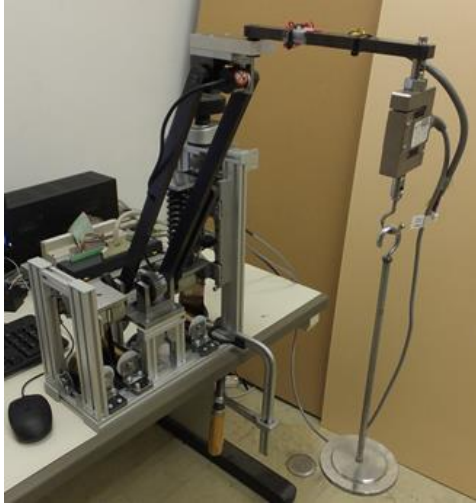


図1 スマート・アシスト機の外観

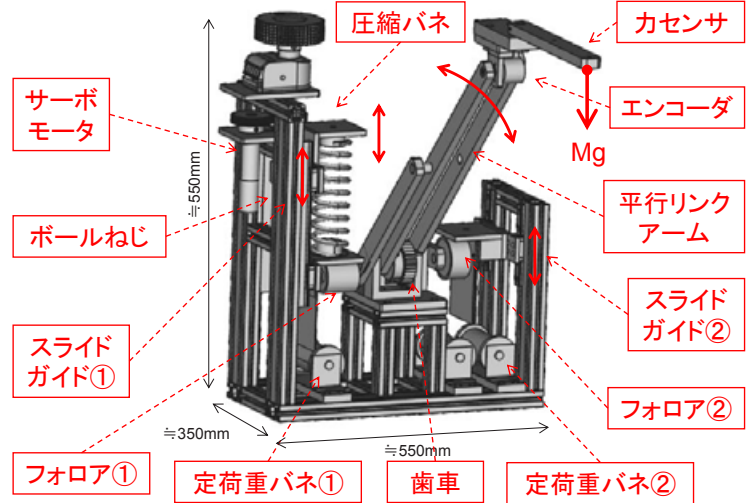
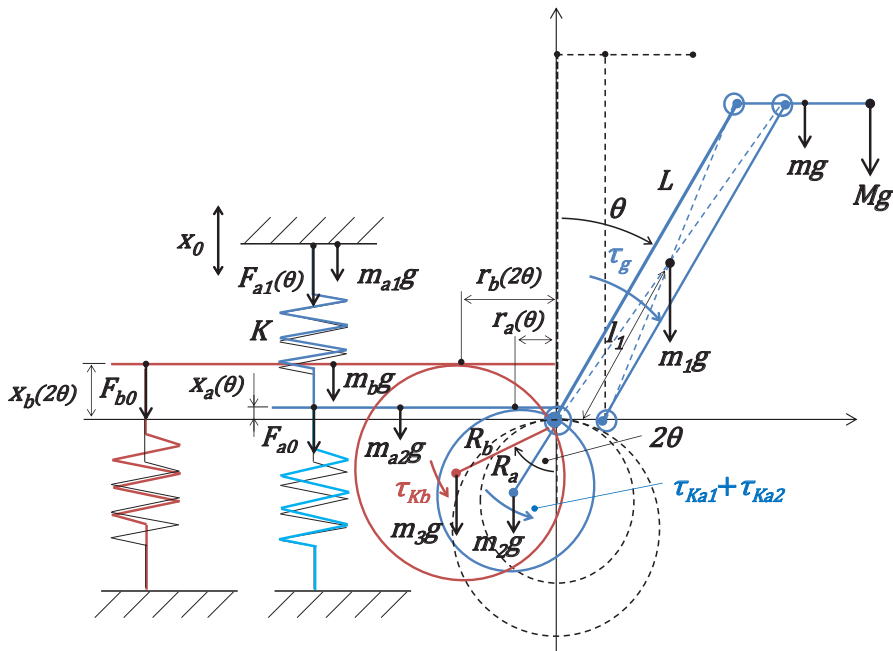


図2 スマート・アシスト機の構成



$$\begin{aligned}\tau_g &= MgL \sin \theta + mgL \sin \theta + m_1 g l_1 \sin \theta - m_2 g R_a \sin \theta - m_3 g R_b \sin 2\theta \\ &\quad - (m_{a1} + m_{a2}) g R_a \sin \theta - m_b g R_b \sin 2\theta \\ &= \{ (M + m) L + m_1 l_1 - (m_2 + m_{a1} + m_{a2}) R_a \} g \sin \theta - (m_3 + m_b) g R_b \sin 2\theta\end{aligned}\quad \text{式(1)}$$

$$\begin{aligned}\tau_K &= \tau_{Ka1} + \tau_{Ka2} + \tau_{Kb} \\ &= [K \{ x_a(\theta) + x_0 \} + F_{a0}] R_a \sin \theta + F_{b0} R_b \sin 2\theta \\ &= \{ K R_a (1 - \cos \theta) + K x_0 + F_{a0} \} R_a \sin \theta + F_{b0} R_b \sin 2\theta \\ &= K R_a (R_a + x_0 + F_{a0}/K) \sin \theta + \{ F_{b0} R_b - (K R_a^2 / 2) \} \sin 2\theta\end{aligned}\quad \text{式(2)}$$

$$x_0 = \{ (M + m) L + m_1 l_1 - (m_2 + m_{a1} + m_{a2}) R_a \} g / (K R_a) - R_a - F_{a0} / K \quad \text{式(3)}$$

$$K = 2 R_b \{ F_{b0} + (m_3 + m_b) g \} / R_a^2 \quad \text{式(4)}$$

図3 スマート・アシスト機の機構モデル

表1 可変自重補償機構の設計パラメータ

項	内容	設計値
m	リンク部質量	1.42 [kg]
m_1	〃	1.72 [kg]
m_2	フォロア①部質量	0.36 [kg]
m_3	フォロア②部質量	0.34 [kg]
m_{a1}	バネ・機構部質量	0.71 [kg]
m_{a2}	スライドガイド①部質量	0.88 [kg]
m_b	スライドガイド②部質量	0.70 [kg]
g	重力加速度	9.8 [m/s ²]
L	アーム長さ	400.0 [mm]
l_1	アーム重心位置	200.0 [mm]
R_a	フォロア①半径	20.0 [mm]
R_b	フォロア②半径	25.0 [mm]
K	圧縮バネ定数	17.31 [N/mm]
F_{a0}	定荷重バネ①	69.6 [N]
F_{b0}	定荷重バネ②	128.4 [N]
θ	アーム回転軸角度	-
x_0	圧縮バネの初期圧縮量	-

が釣り合うことで、自重補償を実現する。対象物の重量によるトルク τ_g 、バネの弾性力によるトルク τ_k はそれぞれ図3中の式(1)、(2)で与えられる。図3中の各記号を表1に定義する。

式(1)、(2)より、 τ_g と τ_k の釣り合い条件として式(3)、(4)が得られる。これらから機構が満たすべき関係式として、式(4)により圧縮バネのバネ定数が、式(3)により圧縮バネの初期圧縮量が求まる。本スマート・アシスト機では、対象物の重量変化による自重補償に対応するため、アームの先端のカセンサにより、対象物の重量を検知し、低出力なサーボモータ(出力 6W)によりボールねじを回転し、圧縮バネのスライドガイドを上下させることで、圧縮バネの初期圧縮量を調整する。

リンク部質量やアーム長さ、円形のフォロア半径などの各設計パラメータは表1の設計値のとおり定めた。アーム角度に対する自重によるトルク τ_g と圧縮バネ、定荷重バネによるトルクの関係を図4に示す。圧縮バネによるトルク τ_{ka1} 、定荷重バネ①によるトルク τ_{ka2} 、定荷重バネ②によるトルク τ_{kb} が合成されることで、自重トルクを打ち消すように作用し、自重補償を実現した。

3. 制御システム

スマート・アシスト機の制御システムの構成と使用機器を図5に示す。対象物の重量をカセンサで計測し、I/Oボードを介して制御用PCに取り込む。制御ソフトウェアにより、式(3)に基づき、自重補償のために必要な圧縮

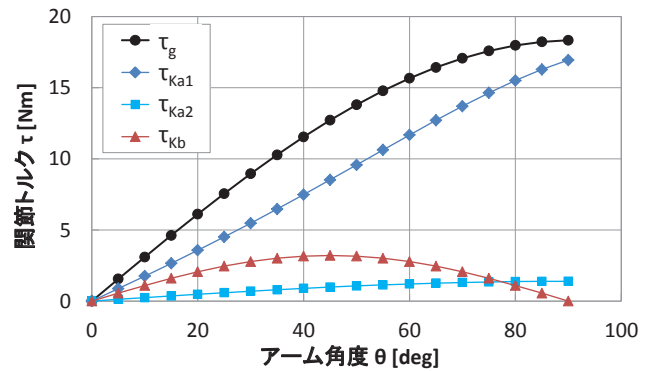


図4 トルクの関係

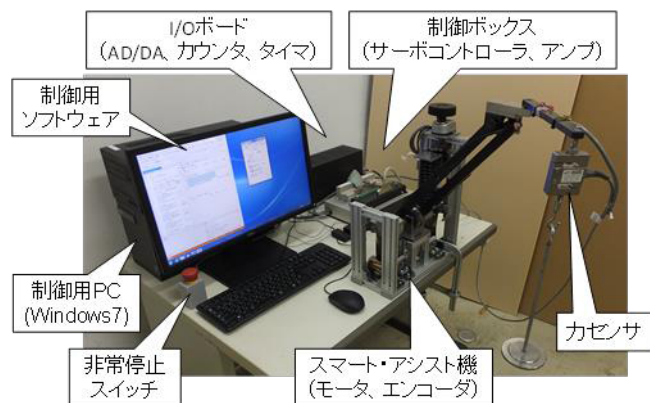


図5 制御システムの構成

バネの圧縮量を算出し、目標値とする。サーボモータにより I/O ボード、制御ボックスを介してボールねじを回転、圧縮バネの圧縮量を目標値に追従させる。制御周期 1ms で、サーボモータを位置制御 (PID 制御)する。

4. 支持荷重特性評価

スマート・アシスト機の支持荷重調整性能、自重補償特性の評価をした結果を図6に示す。なお、図中の※1、※2の区間では、錘の増又は減に対し、カセンサで検知した重量に釣り合うようにサーボモータでバネの圧縮量を調整している。

4.1 支持荷重調整性能の評価

対象物の重量変化に対する支持荷重調整性能を評価するため、錘を +0.5kg → +1.0kg → +1.0kg → -1.0kg → -1.0kg → -0.5kg の順で増減させる実験を行った。なお、アーム先端には 0.85kg の吊り具を吊り下げているため、錘と吊り具を合わせた試験重量の増減は 1.35kg → 2.35kg → 3.35kg → 2.35kg → 1.35kg の5段階になる。

バネ圧縮量の推移を示した図6(c)を見ると、目標値に対し、バネ圧縮量は一定時間経過後に追従するもののその応答性は十分ではない。このことは、図6(a)の※1、※2の区間で錘の増又は減直後にアーム角度が急激に変

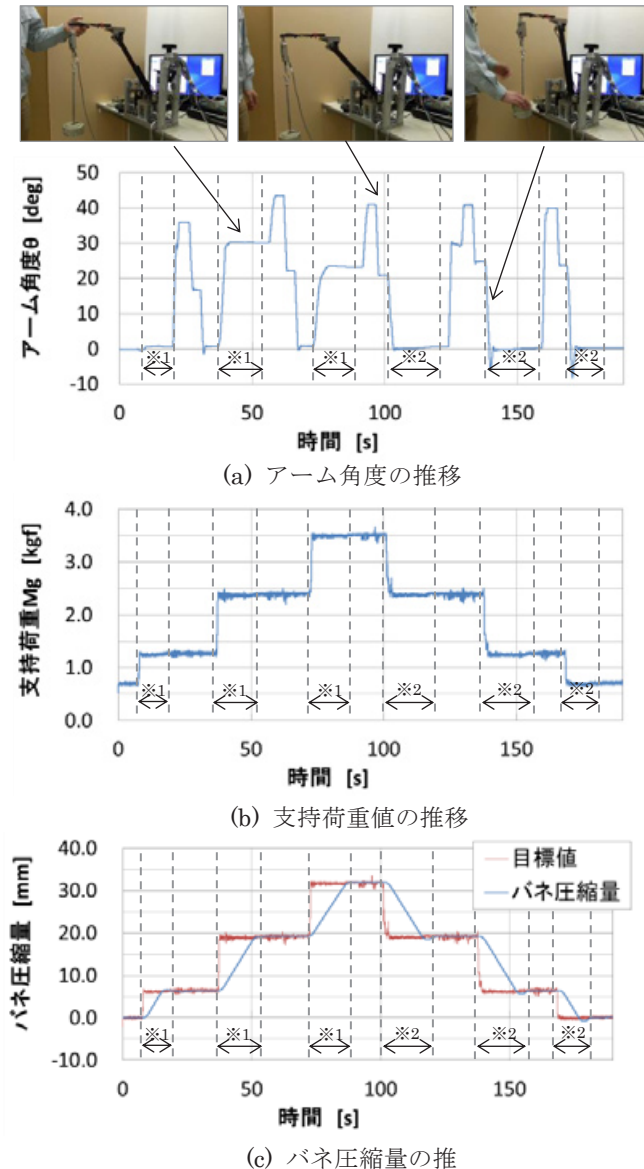


図6 スマート・アシスト機の支持荷重特性

化していることから分かる。このため、現状ではバネの圧縮量が目標値に達するまでアームを手で保持する必要がある。図6(a)の※1区間内において目標値に追従する前にアーム角度の変化が無くなったのは、追従遅れによる支持荷重不足に対してアームが下がるのを手で保持して補ったためである。また、※2区間内において目標値に追従する前にアーム角度の変化が無くなったのは、錘の減少に対して追従遅れによる支持荷重過多となりアームが上がったためである。これらの応答遅れは、ボールねじの駆動トルクを確保するためにサーボモータの減速比を大きく設計したことが要因であり、応答性の改善のためには、サーボモータの駆動トルクを確保しつつ減速比を小さくすることが必要となる。

4.2 自重補償性能の評価

自重補償性能を評価するため、バネの圧縮量が目標値に追従した後の区間(※1、※2以外の区間)において、アーム部を手で上下へ押し引きして動かし、任意のアーム角度で手を放す操作を数回繰り返す実験を行った。手を放した際、その時のアーム角度を維持すれば、一定荷重の支持力を発現(自重補償)できていることになる。

アーム角度の推移を示した図6(a)から、上下へ押す・引く操作の間はアーム角度が変化し、手を放すとアーム角度が変化せずその角度を維持していることが分かる。このことから、対象物の自重によるトルクと機構が発現するバネによるトルクが釣り合い、自重補償できていることが確認できた。

以上のことから、高減速比による応答遅れを改善すれば、スマート・アシスト機は、重量変化に対して自重補償性能を確保できると考えられる。

5. 結び

圧縮バネと定荷重バネ、円形のフォロアを用いる新たな方法(可変自重補償機構)を考案した。この可変自重補償機構の実証モデルとして、対象物の重量に応じて支持力を自動調整するスマート・アシスト機を開発し、対象物の重量に応じて一定荷重の支持力を発現(自重補償)することを確認した。しかし、対象物の重量変化に対する応答性については、十分に追従できておらず、今後、改善する必要がある。

謝辞

本研究は、人工知能研究財団の研究助成により行われたものであり、関係各位に対し、この場を借りて感謝申し上げます。

文献

- 1) 武居直行：日本ロボット学会誌，**29**(6)，508(2011)
- 2) 村山英之，藤原弘俊：日本ロボット学会誌，**29**(9)，783(2011)
- 3) 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(2010)
- 4) 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(2013)
- 5) 木村宏樹，酒井昌夫，竹中清人：あいち産業科学技術総合センター研究報告，**5**，52(2016)