T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

# 論文 / 著書情報
# Article / Book Information

| | |
|---|---|
| 論題(和文) | セル生産用軽作業マニピュレータの開発—非円形プーリ&バネ系による自重補償機構の効果— |
| Title | |
| 著者(和文) | 遠藤玄, 山田浩也, 尾形勝, 広瀬茂男 |
| Authors | Gen Endo, Hiroya Yamada, Masaru Ogata, SHIGEO HIROSE |
| 出典 / Citation | 第26回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3A3-05, , |
| Citation(English) | , 3A3-05, , |
| 発行日 / Pub. date | 2008, 9 |
| 権利情報 / Copyright | 本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。<br>Copyright (c) 2008 The Robotics Society of Japan. |

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

# セル生産用軽作業マニピュレータの開発

## – 非円形プーリ–バネ系による自重補償機構の効果 –

○遠藤玄 (東京工業大学) 山田浩也 (東京工業大学)
尾形勝 (東京工業大学) 広瀬茂男 (東京工業大学)

# Development of a Light Duty Arm for a Cellular Manufacturing System

## Effectiveness of a Weight Compensation Mechanism with a Non-circular Pulley and a Spring

*Gen ENDO (Tokyo Tech), Hiroya YAMADA (Tokyo Tech)
Masaru OGATA (Tokyo Tech), Shigeo HIROSE (Tokyo Tech)

**Abstract**— This paper describes development of a light duty arm for a cellular manufacturing system. We introduce a weight compensation mechanism with a non-circular pulley and a spring. The weight compensation mechanism allows the robot to minimize required actuator power to perform a task. The mechanism contributes to increase not only energy efficiency but also safety for a neighbor human worker.

**Key Words:** Cellular Manufacturing System, Manipulator, Weight Compensation Mechanism

## 1. はじめに

近年，精密電子機器の生産現場では少人数の作業員が部品の取り付け・組み立て・検査など複数の工程を担当するセル生産方式が主流となっている．セル生産方式は従来のライン生産に比して多品種少量生産や生産量調整に即座に対応可能である一方，基本的には人手に頼ったいわば人海戦術的手法である．近年の非正規雇用者の増加など社会問題も考えると，ロボット化への期待は大きい．

しかしながらライン生産に比して，セル生産では高度な認知作業を含む，非常に多種多様の作業を一人の作業者がこなしていることから，そのすべてを代替し無人化できる産業用ロボットを短期間の内に開発することは技術的に困難であろう．それよりも寧ろ作業の一部をロボットが担当することで協働する人間の作業性をより一層向上させるとともに，後のロボット技術の進展に応じて徐々にロボットの作業割合を増加させていくという導入ストーリーが，より現実的かつ実効的な解決策であると我々は考える．図 1 に想定イメージを示す．

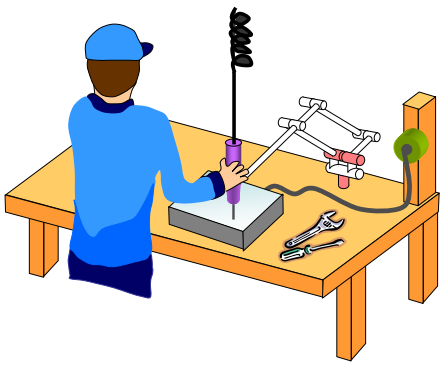

**Fig.**1 Concept image of a light duty arm for a cellular manufacturing system

人と機械の共同作業についてはパートナーロボットなどの文脈で研究されることが多いが，産業用ロボット分野においては専ら人とロボットの作業空間を柵等で囲うことにより分離して安全性を確保してきた [1]．しかしながらこのような分離の概念ではロボットの占有面積が広くなり，省スペースで容易に組み替え可能であるというセル生産方式の本来の特質を失いかねない．

ロボットの人への安全性を確保するため，外形や材質を含めた安全指標 [2] や，痛覚を模した回避運動制御 [3] の提案が行われているが，もっとも根本的な解決策の一つは，**ロボットのアクチュエータ出力を最小化する**ことである．本研究では省アクチュエータ出力の軽作業用軽量アームを開発する．特に本報ではアクチュエータ出力軸と並列に，非円形プーリ－バネ系の自重補償機構を導入することにより，静的に姿勢を保持するための必要アクチュエータトルクが低減出来ることを報告する．

## 2. 非円形プーリ–バネ系によるパラレルリンクアームの自重補償

1 自由度振子系の自重補償を考える（図 2）．振子の角度 $\theta$ とバネ力 $F$，プーリ半径 $r(\theta)$ が次に示す $\theta$ についての恒等式を満たせば，あらゆる角度 $\theta$ で関節トルクゼロの完全バランス系になる．

$$F \cdot r(\theta) \;=\; Mgl\sin\theta \tag{1}$$

ここで $M, g, l$ はそれぞれ先端質量，重力加速度，リンク長さを表す．式（1）は倒立振子・単振り子どちらにも適用可能である．

次に図 3 に示す 6 質点系の 2 自由度のパラレルリンクアームの各関節に励起される自重補償トルクを求める．各質点 $m_i$ について，以下の手順を行う．

1. 質点 $m_i$ へのヤコビ列行 $\mathbf{J_i}(\theta)$ を求める．
2. 質点の重力 $m_i g$ を外力ベクトル $\mathbf{F_i}$ とおく．
3. 関節トルクベクトル $\boldsymbol{\tau_i} = \mathbf{J_i^T}(\boldsymbol{\theta})\,\mathbf{F_i}$ を求める．

各質点について得られたトルクを重ね合わせて，
$\boldsymbol{\tau} = \sum_i \mathbf{J_i^T}(\boldsymbol{\theta})\,\mathbf{F_i}$ より次式を得る．

$$\begin{pmatrix}\tau_1\\ \tau_2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\{m_1 l_1 + m_3 l_3 + (m_4 + m_5 + M) l_a\} g \sin\theta_1 \\ \{m_2 l_2 + m_3 l_b + m_4 l_4 - m_5 l_5 - M l_a\} g \sin\theta_2\end{pmatrix} \tag{2}$$

$\tau_1$ は $\theta_1$ のみの関数であり $\theta_2$ には依存しておらず，また $\tau_2$ についても同様であることから，２自由度は独立であり各々１自由度系に帰着して非円形プーリを設計できる．(なお，非円形プーリの具体的設計手法および自重補償トルク解析の詳細については文献 [4] を参照されたい．)

## 3. 実験機開発

### 3·1 仕様

対象動作として最も基本的なハンドリング作業の一つであるピック＆プレイス作業を検討する．１セルの作業スペースはおおよそ 800[mm] 四方とし，必要最大リーチ長さを同じく 800[mm] と仮定した．また産業用ロボットの性能を現す一般的な指標，標準サイクルタイム（図 4）を 0.4[s] と設定した．ハンドリング対象物は 0.1[kg] 以下と十分に軽量であると仮定し，エンドエフェクタ質量と合わせて可搬重量を 0.5[kg] と設定した．

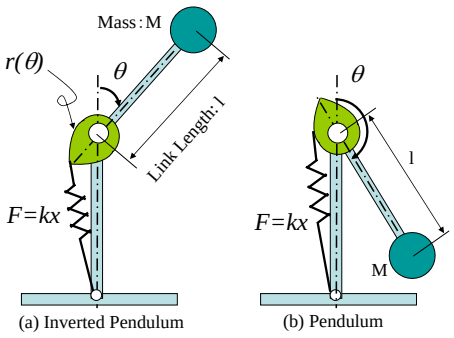


**Fig.**2 Weight compensation mechanism with a non-circular pulley and a spring

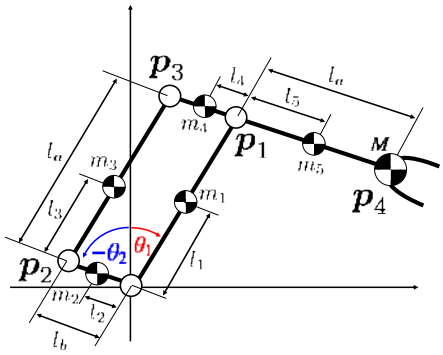


**Fig.**3 2 DOF parallel link arm

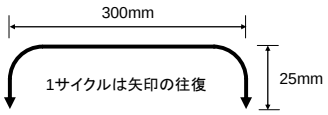


**Fig.**4 Standard cycle time (round-trip)

### 3·2 アーム機構設計

駆動に必要なアクチュエータ出力を最小化するために，なるだけ軽量なアーム機構を考えると，質量の大きいアクチュエータはなるべく基部に集中させ，極力アクチュエータ自身を回動させないことが望ましい．そこで基部に駆動関節 $J_1, J_2$ を配置するとともに，鉛直旋回軸 $J_0$ 周りの慣性モーメントをできるだけ小さくするよう工夫した．またリンク部材は軽量の CFRP 材を用い，リンク長 $l_a$ は最大リーチ近傍の特異姿勢を避けるため余裕を見て $l_a = 500[mm]$ とし，$l_b$ はリンク部全体の剛性とコンパクトな構造を考慮して $l_b = 160[mm]$ と設定した．構成したアームの外観を図 5 に示す．

前述の仕様を元に動力学シミュレーションを行い，各アクチュエータの出力を見積もり，20[W] の DC モータ（マクソンジャパン製：RE25）を選定した．減速機はエンドエフェクタの手先位置精度を高めるため，バックラッシが 0.004[deg] と非常に少ないハーモニック減速機（減速比 1:100）を選定した．バックラッシによる手先位置ガタは最大 0.068[mm] であり十分な精度と思われる．

ピック＆プレイス作業を対象としていることから先端エンドエフェクタがアーム姿勢によらず常に鉛直下向きに保たれていると都合が良い．そこで手首角度を水平保持するための平行リンク機構を導入した．

開発したアームの緒元を表に示す．可搬重量の相違があり必ずしも一概に比較は出来ないが，同程度のリーチを持つ産業用ロボット（例えば [5]，全質量 35[kg]）に比して著しく軽量に構成できていることが分かる．

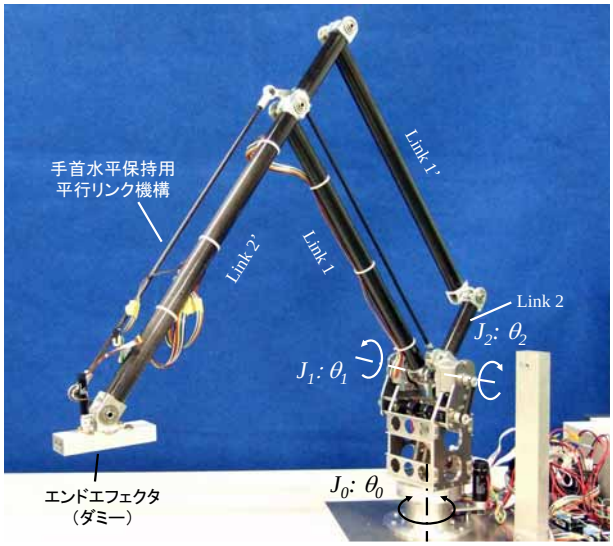


**Fig.**5 Prototype model of a light duty arm

| | |
|---|---|
| アーム全長 [mm] | 500 (Link 1) +500(Link 2') |
| 最大動作領域 [mm] | R=985 |
| 動作角度 [°] | $J_0$: $\theta_0$ = ±180° |
| | $J_1$: $\theta_1$ = 0, 90° (ただし $\theta_1$ - $\theta_2$ > 20°) |
| | $J_2$: $\theta_2$ = -90, 0° (ただし $\theta_1$ - $\theta_2$ < 160 °) |
| アクチュエータ | Maxon RE25 (20W)×3 |
| 可搬質量 [kg] | 0.5 |
| 全質量 [kg] | 4.5 |

**Fig.**6 Specification

### 3·3 自重補償機構

アーム機構の 3DCAD データより各リンクアセンブリごとの質量および重心位置を算出し，式 (2) に適用することで自重補償トルクが算出できる．リンク長 0.5[m] の１自由度振子系に帰着させると，関節 $J_1$ は先端質量 $M = 1.18[kg]$ の倒立振子系，関節 $J_2$ は $M = 0.33[kg]$ の単振り子系と等価であることがわかった．長いリンクの関節 $J_1$ の方がより大きな自重トルクが働いていることが理解できる．

質量解析に基づき設計した非円形プーリの形状を図 7 に示す．設計上の自重補償範囲は鉛直上向きを角度ゼロとして $14.5 \leq \theta_1 \leq 90.0, -90.0 \leq \theta_2 \leq 0.0$ [deg] である．$\theta_1$ はより負荷荷重が高いことから２本のバネを並列で用いることとした．用いたバネの緒元は関節 $J_1$ に対しては自然長 100[mm]，バネ定数 1.15[N/mm]，初張力 14.71[N]，$J_2$ に対しては自然長 80[mm]，バネ定数 1.57[N/mm]，初張力 14.71[N]（ミスミ製：AUFM12-100, -80）である．

また原理試作 [4] ではワイヤの伸びと太さが自重補償精度を低下させたため，本稿では繰り返し曲げにも十分な耐力を有し，伸びもほとんどなく，厚みも 0.1[mm] と薄いスチールベルトを採用した．

関節の駆動機構は $J_1, J_2$ とも同様で詳細を図 8 に示す．アクチュエータ出力はタイミングベルトを介し，ハーモニック減速機に入力されている．これはタイミングプーリ直径を変更することで減速比を再調整できるように配慮したためである．ハーモニック減速機の出力はリンク部材と非円形プーリを回転駆動する．非円形プーリがスチールベルトを巻き取ることにより，バネが引き伸ばされ補償トルクが生成される．なお，バネは駆動軸と**並列に**配置されていることから，バネを導入することによる関節剛性の低下は発生しない機構である．

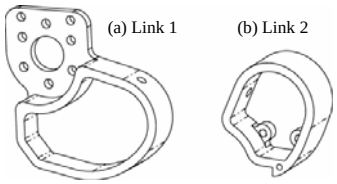


**Fig.**7 Derived shape of the non-circular pulleys

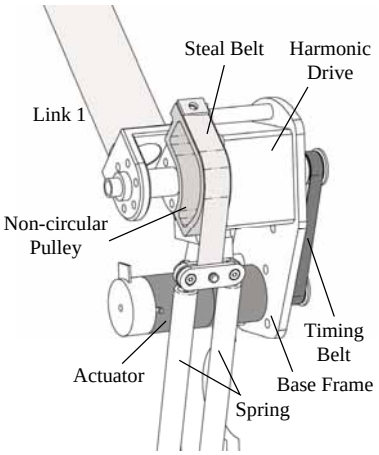


**Fig.**8 Joint diving mechanism with the non-circular pulley and the springs

## 4. 実験

自重補償機構の効果を検証するため，$\theta_1, \theta_2$ の可動範囲内で絶対空間座標で 10cm 間隔の格子点上にアーム先端位置を静止させ，その姿勢を保持するのに要するトルクの大きさをアクチュエータ電流絶対値およびトルク定数 43.8[mNm/A] から算出した．

自重補償機構がない場合のトルク分布を図 9，10 に，ある場合を図 11，12 に示す．全図ともイチョウ型の外枠は可動範囲を表し，等高線は 5[mNm] ごとに図示した．リンク長の長い関節 $J_1$ では自重補償機構がない場合，手先位置が最大可動範囲に近づくにつれ大きな自重トルクが発生しており，その最大値は 63.1[mNm] であった（図 9）．アクチュエータの最大連続トルクは 28.4[mNm] であることから，このアクチュエータでは可動範囲内の半分以上の領域で姿勢が保持できないことになる．これに対し自重補償機構を導入した場合，必要最大トルクは 80%も減少し，その値は 12.7[mNm] であった（図 11）．よって可動範囲内すべての領域で姿勢を保持することが可能である．同様に図 10，12 より，$J_2$ の最大トルク値は 26.3[mNm] から 12.4[mNm] へと 50%以上減少することがわかった．

以上から自重補償機構が低出力アクチュエータでの静的な姿勢保持に極めて有効であることが確かめられた．

次にタクトタイム 3.2[s] で標準サイクルを行った場合のアクチュエータ電流絶対値を計測した．図 13, 14 に結果を示す．自重補償機構がある場合，$J_1$ 軸のピーク電流をおよそ 30%低下できることが分かる．また徐々にサイクルタイムを減少し動作を高速化した運動を観察すると，自重補償機構なしではモータドライバの電流制限に抵触し軌道が不連続になる様子が度々観測されたが，自重補償機構がある場合，滑らかな動作が確認できた．よって動的な運動生成においても自重補償機構の有効性が確かめられた．

## 5. まとめ

本報ではセル生産現場において人との共存環境下で使用可能な，軽作業用アームを目標として試作開発を行った．非円形プーリ－バネ系によりアームの自重トルクを補償することが可能であり，低消費電力であることが定量的に示された．今後はより実際的な動作を対象とし，既存の産業用ロボットと比較しつつ改良を重ねる予定である．

[1] “産業用ロボット－安全要求事項－第１部：ロボット”, JIS B 8433
[2] 生田幸士, 野方誠:“福祉ロボットの安全性に関する統一的評価法の提案　－危険性の定量化による安全設計対策の評価－”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.3, pp.363–370, 1999.
[3] 松永信智, 川路茂保:“表面痛のモデリングとロボット回避運動への応用”, 計測自動制御学会論文集, vol.43, no.7, pp.599–605, 2007.
[4] 遠藤玄, 広瀬茂男: “非円形プーリ-バネ系による自重補償機構パラレルリンクマニピュレータへの適用”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会論文集’08, 1A1-G20, 2008.
[5] “デンソー垂直多関節ロボット VS-G シリーズ”, http://www.denso-wave.com/ja/robot/product/latest/vsg/index.html

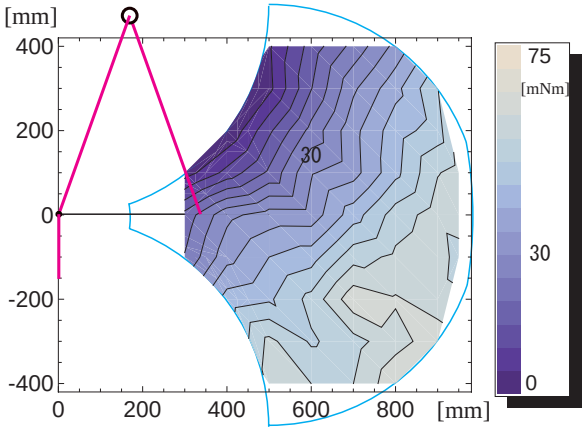


**Fig.**9 Required torque $\tau_1$ without compensation

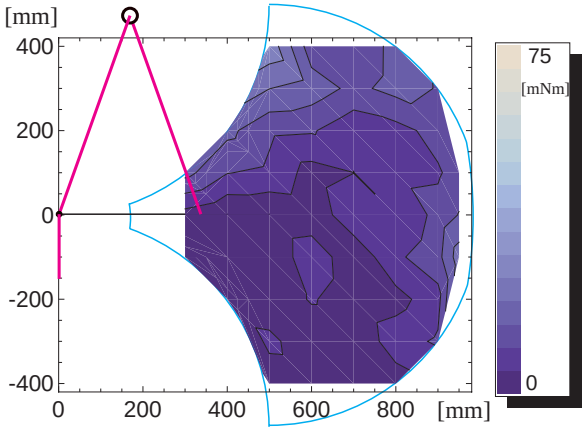


**Fig.**10 Required torque $\tau_2$ without compensation

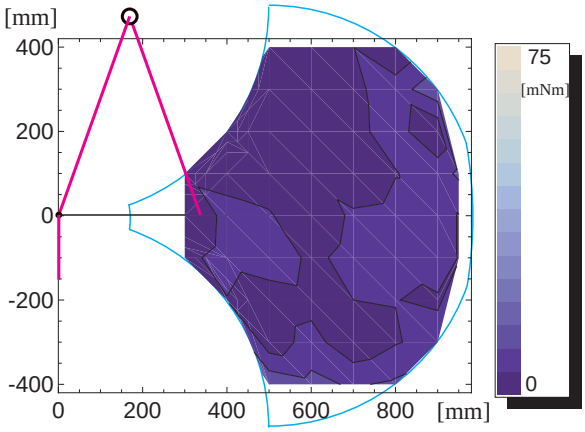


**Fig.**11 Required torque $\tau_1$ with compensation

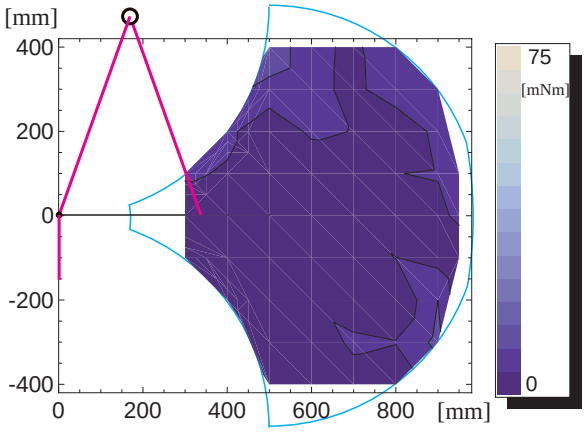


**Fig.**12 Required torque $\tau_2$ with compensation

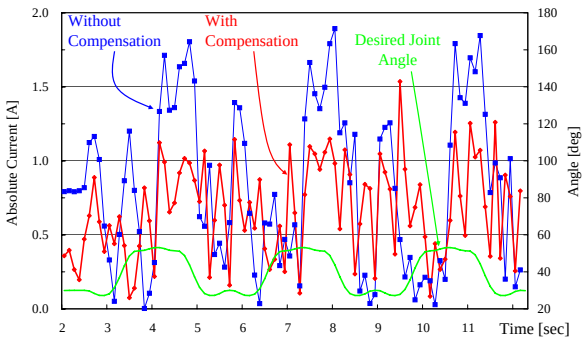


**Fig.**13 Measured current on J1

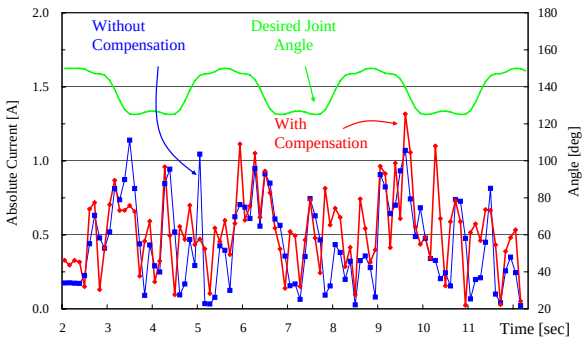


**Fig.**14 Measured current on J2