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)	
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。 Copyright (c) 2008 The Robotics Society of Japan.

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.

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 θ とバネカF, プーリ半径 $r(\theta)$ が次に示す θ につ いての恒等式を満たせば, あらゆる角度 θ で関節トル クゼロの完全バランス系になる.

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

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 $J_i(\theta)$ を求める.
- 2. 質点の重力 *m_ig* を外力ベクトル **F**_i とおく.
- 3. 関節トルクベクトル $\tau_i = \mathbf{J}_i^{\mathbf{T}}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{F}_i$ 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, $au = \sum_i \mathbf{J}_i^{\mathrm{T}}(heta) \mathbf{F}_i$ より次式を得る.

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

 τ_1 は θ_1 のみの関数であり θ_2 には依存しておらず,また τ_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.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
	$J_0: \theta_0 = \pm 180^\circ$
動作角度[°]	$J_1: \theta_1 = 0, 90^\circ (t_2 t_2 \cup \theta_1 - \theta_2 > 20^\circ)$
	$J_2: \theta_2 = -90, 0^{\circ} (title \theta_1 - \theta_2 < 160^{\circ})$
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. θ_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 J₁, J₂ 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





4. 実験

自重補償機構の効果を検証するため, θ_1 , θ_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,J1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 τ_1 without compensation



Fig.10 Required torque τ_2 without compensation



Fig.11 Required torque τ_1 with compensation



Fig.12 Required torque τ_2 with compensation



Fig.13 Measured current on J1



 ${\bf Fig.}14$ Measured current on J2