T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	減速機付きアクチュエータの駆動冗長性による軽量化
Title(English)	Mass reduction of geared actuator by means of redundant drive
著者(和文)	斎藤天丸, 菅原雄介, 武田行生
Authors(English)	Takamaru Saito, Yusuke Sugahara, Yukio Takeda
出典(和文)	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022予稿集, , , 2P1-L11
Citation(English)	, , , 2P1-L11
発行日 / Pub. date	2022, 6

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

減速機付きアクチュエータの駆動冗長性による軽量化

Mass reduction of geared actuator by means of redundant drive

○学　斎藤　天丸（東京工業大）　正　菅原　雄介（東京工業大）
正　武田　行生（東京工業大）

Takamaru SAITO, Tokyo Institute of Technology
Yusuke SUGAHARA, Tokyo Institute of Technology
Yukio TAKEDA, Tokyo Institute of Technology

In order to make assist devices light, compact and easy to customize, we proposed to apply redundant motors (RMs). RM consists of many small motors with reduction gears in parallel instead of one large geared motor. Thanks to the composition of RM, compact design will be enabled by arranging many small motors with in the allowable space, and its mass can be reduced by distributing load torque to multiple working teeth pairs. This paper presents a theoretical analysis result to show the mass-reduction principle of an actuator by RM concept. Practical design and construction of RM is discussed.

***Key Words*:** Actuator, Redundant motor, Assistive device, Mass reduction, Design, Redundant drive

1.　緒言

1.1 研究背景

高齢者の運動機能低下を補い自立して安全な運動を実現する装着型の歩行支援装置の需要が高まっている[1]．ユーザが毎日の生活で使用する支援装置は，軽量，コンパクトかつ個々のユーザに合わせてカスタマイズできることが求められる．この課題に対して，著者らはアクチュエータの小型軽量化に取り組んでいる．

1.2 開発コンセプトと研究目的

軽量，コンパクトでカスタマイズ可能なアクチュエータとして，図 1 のように，1 自由度の出力を得るために出力の大きな 1 つの減速機付モータを使用する代わりに，出力の小さなモータを減速機を介して複数並列に配置することを考える．以降はこのアクチュエータを冗長モータと呼ぶが，マルチモータと呼ばれることも多く，福祉分野での応用も期待されている[2]．冗長モータにすることで，一定容量の小型モータを決められた外形に合わせて必要数配置し，コンパクトな設計が可能[3]である．本報告では支援装置に組み込む際に邪魔になりにくい扁平形状にモータを配置することとする．また，冗長モータはモータ個数を変えるだけで出力トルクを変更できるので，ユーザに合わせたカスタマイズが可能である．また，冗長モータでは，減速歯車にかかる負荷を分散可能であり，減速機の軽量化に寄与すると考えられる．

本報告では冗長モータによる減速機の負荷分担に着目して冗長モータによるアクチュエータの軽量化の定量的な検討と軽量化メカニズムの考察を行うとともに，プロトタイプ製作による冗長モータコンセプトの妥当性の検証を行った結果を示す．

2.　冗長モータの減速歯車総質量に関する理論的検討

本章では冗長モータの減速歯車総質量を定量的に評価する．さらに，冗長モータの減速歯車総質量に対する軽量化メカニズムを考察する．

2.1 減速歯車総質量の定量的な評価

解析対象としたモデルは図 2 に示すような減速比$1/G = 1/(Z_w/Z_p) = 1/(R_w/R_p)$の 1 段の減速歯車対である．使用するモータの数はN個とし，モータ側のN個の小歯車が出力側の 1 個の大歯車に対して並列にトルクを伝達する．単純なモデルとするため，多段減速や厚さの異なる歯車の使用，歯車の肉抜き，モータ自体の質量，異なる仕様のモータを使用することによる定格回転数の違いについては考慮しない．

与えられたN, Gを満たす減速歯車対は様々考えられるが，減速歯車の総質量Mを最小にする設計条件について考える．

まず，次のように変数を定める．小歯車の歯数:Z_p，大歯車の歯数:Z_w，小歯車のピッチ円半径:R_p，大歯車のピッチ円半径:R_w，歯幅: b，モジュール:m，材料の密度:ρ，許容曲げ応力:σ_{al}，歯車歯数Zに対する歯形係数:$Y_F(Z)$．これらを使用して減速歯車総質量Mを表した．そのうえで制約条件として負荷トルクτ_wが作用した時に歯車の曲げ強度が十分であること，小歯車の歯数がZ_0以上であること（すなわち$Z_0 \leq Z_p$）の 2 点を考慮し，減速歯車総質量Mを最小化する設計変数とその時のMの値M_{min}を求めた．

その結果，N, Gに対するM_{min}は式(1)となった．

$$M_{min} = k_M \left(\frac{G}{N} + \frac{1}{G}\right) \tag{1}$$

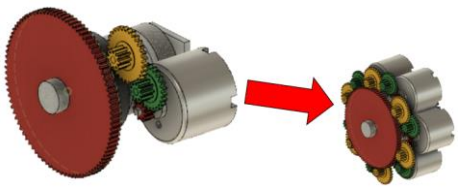


Fig. 1 Concept of redundant motors

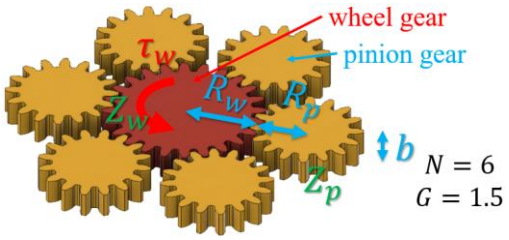


Fig. 2 Analysis model of redundant motors

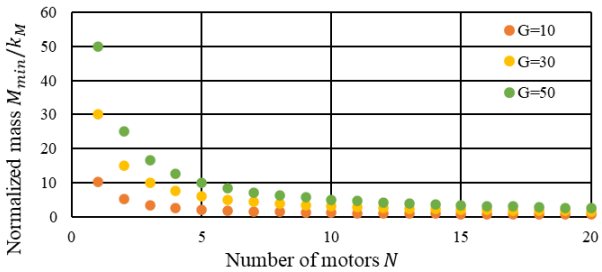


Fig. 3 Relationship between number of motors and mass of reduction gears

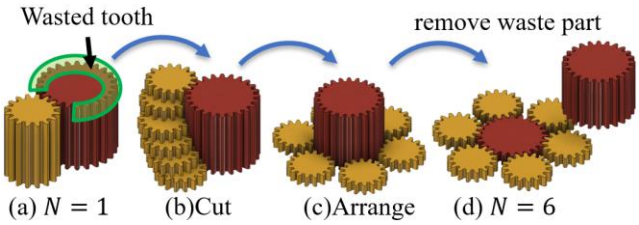


Fig. 4 Conceptual explanation of reduction of mass of gears by using redundant motors

ここで，k_Mは加わる負荷，歯車の材質，歯形などに依存する定数で，$k_M = \rho\pi\tau_w Z_0 Y_F(Z_0)/2\sigma_{al}$で表される．

これを減速比$1/G = 1/10, 1/30, 1/50$の条件について，横軸をモータの個数Nとして，縦軸にM_{min}/k_Mをプロットしたグラフを図 3 に示す．グラフから，モータの個数を増やすと減速歯車総質量が低減することがわかる．よって，冗長モータにより減速歯車が軽量化できることを理論的に示すことができた．

2.2 冗長モータによる軽量化メカニズムの考察

前節で示したモータの個数が増えると減速歯車総質量が低減することのメカニズムを定性的に考察する．

Nが 1 の場合の歯車対では，図 4 (a)に緑色で示すように，常に大歯車の多くの歯がかみ合っておらず，トルク伝達に使用されていない．この無駄を省くため，図 4 (b)のように歯車をN個に薄くスライスすることを考える．スライスして図 4 (c)のように並べ替えても，歯車の強度が歯の曲げ強度に依存するとすれば大歯車にかけられる最大許容トルクは変化せず，小歯車の総質量も変わらない．しかし，並べ替えを行うことで，図 4 (d)のように大歯車の一部が不要となり，大歯車の総質量を$1/N$に軽くすることができる．また，並べ替えによって，大歯車の歯を全周にわたって効率よく使うことができている．

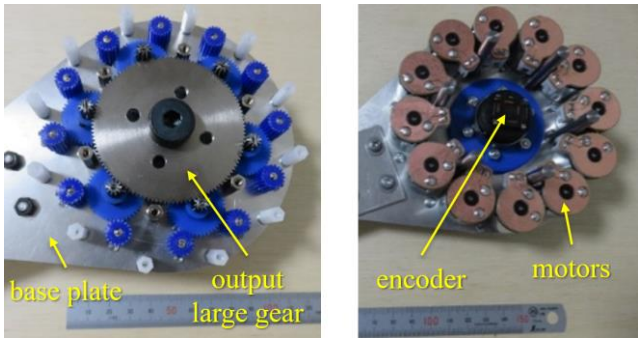
3. 冗長モータの試作および検討

本章では冗長モータを具体的に設計・試作した結果について述べる．

歩行支援装置への応用を想定し，軽量で回転軸方向に短い扁平形状であることを条件として冗長モータを設計した．

まず，減速歯車総質量を軽量にするためには図 3 の結果からモータはできるだけ多いほうが望ましい．今回は大歯車の周囲に配置する歯車やモータのサイズを考慮して，$N = 12$とした．各モータは出力 4W のものとし，$G = 30$とした．

次に，冗長モータを回転軸方向の長さが短い扁平形状に構成するために部品の配置を工夫した．まず出力軸には出力用大歯車，アンギュラ玉軸受を 2 つ，回転角度センサのみを取り付けた．扁平形状にするためには軸の長さを短く保つ必要があるので，回転軸付近にはこれ以外の部品を配置しないように留意して設計した．そこで出力用大歯車以外の歯車やモータは出力軸の周りの円周上に配置することとした．



(a) view from gear side (b) view from motor side

Fig. 5 Photos of prototype

以上の検討結果をもとに試作したプロトタイプを図 5 に示す．ベースプレートを境にして，図 5 (a)が減速歯車側から撮影したもので，図 5 (b)がモータやエンコーダが配置されている側から撮影したものである．設計の都合上 2 段減速とし，出力側の 1 段目は 1 つの大歯車が 6 つの小歯車，モータ側の 2 段目は 6 つの大歯車それぞれが 2 つずつの小歯車とかみ合うようになっている．試作した$N = 12$の冗長モータは，回転軸方向の長さ 55 ㎜，直径 112 ㎜の扁平形状と質量約 0.8kg を達成した．

4. 結言

本研究では軽量，コンパクトでカスタマイズ可能なアクチュエータを実現するため，出力の大きな 1 つのモータを使用する代わりに出力の小さなモータを複数並列に使用する冗長モータを適用することを提案し，その質量について減速歯車の強度設計の観点から理論的な考察を加えた．また，この冗長モータのコンセプトの妥当性についてプロトタイプの設計・試作を通して検討を行った．本研究の結果と今後の課題は以下の通りである．

(1) 冗長モータにすることにより，1 つのモータを使う場合と比較して，減速機の歯車総質量を軽くできることが理論解析により明らかになった．

(2) 冗長モータを適用した扁平形状のアクチュエータが構成可能であることをプロトタイプ製作により示した．

今回の理論モデルは減速機の部分のみについて簡略化したモデルであり，個々のモータの質量を考慮した検討や冗長モータの詳細な最適設計などについては今後の検討課題である．

なお，本研究の一部は，日本精工株式会社のサポートにより実施されたことを付記し，謝意を表する．

参考文献

[1] 厚生労働省 老健局 高齢者支援課，経済産業省 製造産業局 産業機械課，ロボット技術の介護利用における重点分野（平成 29 年 10 月改訂），(online), available from <https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000180168.html>（参照日，2022 年 2 月 26 日）

[2] 斎藤 之男，薬袋 浩一，羽根吉 寿正，梅村 敦史，"マルチモータによる福祉ロボット駆動用アクチュエータの基礎研究，ライフサポート", 18 巻, Supplement 号, p. 155, 2006

[3] Kenji Kaneko, Hiroshi Kaminaga, Takeshi Sakaguchi, Shuuji Kajita, Mitsuharu Morisawa, Iori Kumagai, and Fumio Kanehiro, "Humanoid Robot HRP-5P: An Electrically Actuated Humanoid Robot With High-Power and Wide-Range Joints", IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 4, no. 2, pp.1431-1438, APRIL 2019