二関節同時駆動機構を持つロボットアームへの操作性指標の適用

○吉田憲吾　呉世訓　堀洋一 (東京大学)

Application of manipulability measures for robot arm equipped with bi-articular driving mechanism

Kengo Yoshida, Sehoon Oh and Yoichi Hori(The University of Tokyo)

Abstract— This paper describes extended manipulability measures and its application for robot arm equipped with bi-articular driving mechanism. Bi-articular driving mechanism is an actuator which drives both two joint simultaneously. It mimics animal bi-articular muscle. Conventional manipulability measures do not consider existence of such actuator and can not represent characteristics of target robot arm correctly. Our extended measures solves this problem. Proposed measures are verified by the experiment. Also this paper shows difference of characteristics between target arm and conventional arm.

Key Words: Manipulability measures, Bi-articular muscle

1. はじめに

これまで、シリアルリンクマニピュレータの操作性を評価する指標が様々提案されてきた。古典的な物としては各関節のトルクが手先加速度に変換される関係による指標である動的可操作性楕円体 (DME)、静的な関節トルクが手先における力に変換される関係による指標である操作力楕円体 (MFE) といったものが挙げられる。さらに近年、倉爪らによってこれらを統合する概念としてインピーダンスマッチング楕円 (IME) という指標が提案された [1]。これはシリアルリンクマニピュレータが負荷となる物体を駆動する際に、各関節におけるトルクから物体に伝わる力の関係による指標として表わされる。

しかしながらこれらの指標は、生物の二関節筋のように複数の関節を同時に駆動するアクチュエータを持つアームに対して適用することができず、生物や生物型ロボットアームの操作特性の評価や比較に問題があった。本論文では、複雑なアクチュエータの配列を持つアームにも対応する拡張した指標を示す。また、二関節筋を二関節同時駆動機構として実現したロボットアーム [3] において、出力の特性を指標がうまく表せていることを実験において示す。

2. マニピュレータの評価指標

2·1 基となる指標

ここでは基となる指標としてインピーダンスマッチング楕円を取りあげる。まず、L は各トルクの制限値で式 (1) のように定義される。

$$\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(\tau_1^{limit}, \tau_2^{limit}, \ldots, \tau_n^{limit}) \tag{1}$$

N 個の関節からなるシリアルリンクマニピュレータの運動方程式はラグランジュ法等により求めることができ、式 (2) のように表すことができる。

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{M(q)\ddot{q}} + \boldsymbol{C(q,\dot{q})} + \boldsymbol{G(q)} + \boldsymbol{J(q)}^T\boldsymbol{F_e} \tag{2}$$

ここで、$\boldsymbol{J(q)}$ はヤコビ行列、$\boldsymbol{M(q)}$ はマニピュレータの慣性行列、$\boldsymbol{C(q,\dot{q})}$ は速度二乗項、$\boldsymbol{G(q)}$ は重力項、

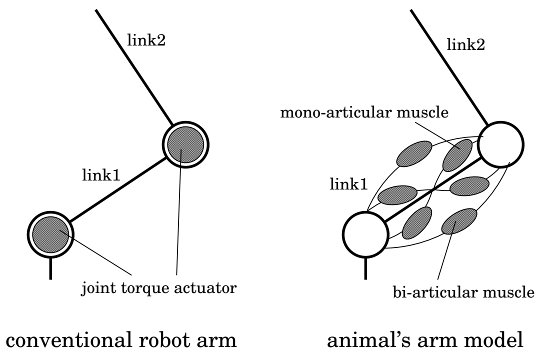


Fig.1 従来のロボットアームモデルと生物のアームモデル

$\boldsymbol{F_e}$ は手先に加わる外力である。次に手先物体の運動方程式は式 (3) と表わすことができる。

$$\boldsymbol{F_e} = \boldsymbol{M_p}(\boldsymbol{\ddot{x}} + \boldsymbol{\ddot{g}}) \tag{3}$$

ここで $\boldsymbol{\ddot{x}}$ は手先加速度、$\boldsymbol{\ddot{g}}$ は重力加速度、$\boldsymbol{M_p}$ は物体の質量である。式 (2)、式 (3) より、関節トルクを式 (4) のように表わすことが可能である。

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\tau} &= \boldsymbol{Q(q)}(\boldsymbol{F_e} - \boldsymbol{F_{bias}})\\ \boldsymbol{Q(q)} &= \boldsymbol{J(q)}^T + \boldsymbol{M(q)J(q)}^\dagger \boldsymbol{M_p}^{-1}\\ \boldsymbol{F} &= (\boldsymbol{J(q)}^T + \boldsymbol{M(q)J(q)}^\dagger \boldsymbol{M_p}^{-1})^\dagger\\ &\times[\boldsymbol{M(q)J(q)}^\dagger(\boldsymbol{g} + \boldsymbol{\dot{J}(q)\ddot{q}}) - \boldsymbol{C(q,\dot{q})} - \boldsymbol{G(q)}]\end{aligned} \tag{4}$$

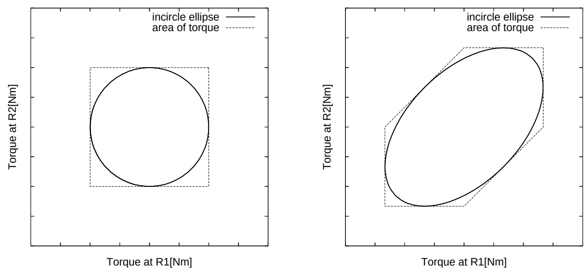
ここで F_{bias} は速度や重力の影響を表すバイアス項として捉えることができる。ここで正規化トルク $\boldsymbol{\tilde{\tau}}$ を式 (5) のように考える。$\boldsymbol{L}$ は式 (1) で定義した制限行列である。

$$\boldsymbol{\tilde{\tau}} = \boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{\tau} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{\tilde{\tau}}^T\boldsymbol{\tilde{\tau}} \leq 1 \tag{6}$$

この時式 (6) のように表わすことができるから、式 (4)(5)(6) より式 (7) のようにインピーダンスマッチング楕円体が定義される。

$$(\boldsymbol{F_e} - \boldsymbol{F_{bias}})^T\boldsymbol{Q}^T(\boldsymbol{L^{-1}})^2\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{F_e} - \boldsymbol{F_{bias}}) \leq 1 \tag{7}$$



without　　with

Fig.2 Range of Joint Torques with or without Bi-articular Muscles

MFE 及び DME は IME の特殊な形として表される。それぞれ静止状態 ($\dot{\boldsymbol{q}} = 0$) かつ重力の影響を無視 ($\dot{\boldsymbol{G}}(\boldsymbol{q}) = 0$, $\boldsymbol{g} = 0$) した状況を考えると、$\boldsymbol{M_p} = 0$ の時式 (7) は DME と等しくなり、$\boldsymbol{M_p} = \infty$ の時 MFE と等しくなる。

2·2　複雑なアクチュエータの配列を持つマニピュレータへの拡張

ここで生物のアームのように複雑なアクチュエータの配列を持つ場合を考える。生物には図 1 のように複数の関節に跨って力を発揮するアクチュエータが存在する。これを模倣したロボットにおいては前述の指標をそのまま適用することはできない。指標の楕円体は、関節空間において各関節トルクを出力できる領域に内接する楕円体 (図 2 左側) が、対応する空間に写像されたものである。二関節筋が存在すると関節トルクは独立でなくなり、トルクの取りうる領域は図 2 右側のようになる。そこでこの出力領域にうまく内接できるような拡張を行なうことにする。

まず、アクチュエータ配列行列 $\boldsymbol{A_{lign}}$ を用いて各アクチュエータの発生するトルクから、各関節トルクへの変換を式 (8) と表す。

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{A_{lign}} \boldsymbol{\tau_{act}} \tag{8}$$

ここで $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \ldots, \tau_n]$ とし、$\boldsymbol{\tau_{act}} = [\tau_{act1}, \tau_{act2}, \ldots, \ \tau_{actm}]$ とする。$\boldsymbol{A_{lign}}$ は M × N の行列で、各要素は m 番目のアクチュエータから n 番目の関節へのトルクの伝達係数 $a_{n,m}$ を表す。

$\boldsymbol{A_{lign}}$ は一般的に正則な行列ではないので、式 (8) の逆変換には擬似逆行列を用いる。ここでアクチュエータの発するトルクの制限値を式 (1) にならって、式 (9) のように表す。

$$\boldsymbol{L_{act}} = \mathrm{diag}(\tau_1^{actlim}, \tau_2^{actlim}, \ldots, \tau_m^{actlim}) \tag{9}$$

さらに正規化された各アクチュエータの出力トルクは式 (10) のように置くことができる。

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}}_{\boldsymbol{act}} = c_{omp} (\boldsymbol{L_{act}} \boldsymbol{A_{lign}})^{\dagger} \boldsymbol{\tau} \tag{10}$$

ここで c_{comp} は正規化のための補正項である。よって式 (11) のように正規化されたアクチュエータの出力トルクから楕円体を導くことができる。

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}}_{\boldsymbol{act}}{}^T \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{\boldsymbol{act}} \leq 1 \tag{11}$$

これにより式 (7) は式 12 のように拡張される。

$$(\boldsymbol{F_e} - \boldsymbol{F_{bias}})^T \boldsymbol{Q}^T \boldsymbol{E_{xtend}} \boldsymbol{Q} (\boldsymbol{F_e} - \boldsymbol{F_{bias}}) \leq 1 \tag{12}$$

ただし

$$\boldsymbol{E_{xtend}} = c_{omp}^2 (\boldsymbol{L_{act}} \boldsymbol{A_{lign}})^{\dagger T} (\boldsymbol{L_{act}} \boldsymbol{A_{lign}})^{\dagger} \tag{13}$$

2·3　3 対 6 筋を持つ 2 リンクマニピュレータへの適用

ここでは c_{omp} が二関節筋を持つ 2 リンクマニピュレータの際にどのように定義されるかを示す。図 2 に示すように、二関節筋を持つマニピュレータではトルクの取りうる領域は六角形を書き、楕円の拡大縮小によって各辺に接するように c_{comp} が調整される。各トルクが正負対称に出力できるとすると、対向する各辺に接するように c_{omp} の値を計算し、その最大の物を選べば良い (式 (14))。

$$c_{omp} = \max(c_{ompA}, c_{ompB}, c_{ompC}) \tag{14}$$

ここで、

$$(\boldsymbol{L_{act}} \boldsymbol{A_{lign}})^{\dagger T} (\boldsymbol{L_{act}} \boldsymbol{A_{lign}})^{\dagger} = \begin{pmatrix} e_{1,1} & e_{2,1} \\ e_{1,2} & e_{2,2} \end{pmatrix}$$

$$L_{act} = \mathrm{diag}(\tau_1^{actlim}, \tau_2^{actlim}, \tau_3^{actlim}) \tag{15}$$

式 (15) のように置くと、対向する各辺と接する条件から導かれる c_{ompA},c_{ompB},c_{ompC} の値はそれぞれ式 (16,17,18) のように置くことができる。

$$c_{ompA} = \frac{1}{\tau_2^{actlim} + \tau_3^{actlim}} \sqrt{\frac{4e_{1,1}}{e_{cnv}}} \tag{16}$$

$$c_{ompB} = \frac{1}{\tau_1^{actlim} + \tau_3^{actlim}} \sqrt{\frac{4e_{2,2}}{e_{cnv}}} \tag{17}$$

$$c_{ompC} = \frac{4(e_{1,1} + e_{1,2} + e_{2,1} + e_{2,2})}{e_{cnv} (\tau_1^{actlim} + \tau_2^{actlim})^2} \tag{18}$$

ただし

$$e_{cnv} = 4e_{1,1}e_{2,2} - (e_{1,2} + e_{2,1})^2$$

2·4　各楕円体の特徴量

各楕円体の特徴量を比較の指標として考え、ここでは超体積、短軸の長さ、短軸と長軸の比を取りあげる。$c_{omp} \boldsymbol{L_{act}}^{-1} \boldsymbol{A_{lign}}^{\dagger} \boldsymbol{Q}$ の特異値を大きい順に、$\sigma_1, \sigma_2, ..., \sigma_M$ とする。ここで超体積に比例する指標として式 (19) を定義する。

$$w_v = \sigma_1^{-1} \cdot \sigma_2^{-1} \cdot \ldots \cdot \sigma_M^{-1} \tag{19}$$

これは関節トルクから全体としてどれくらい力に変換できるかという指標となる。一方、各方向への出力のバランスという観点から二つの指標を定義する。

$$w_m = \sigma_1^{-1} \tag{20}$$

$$w_r = \frac{\sigma_M}{\sigma_1} \tag{21}$$

式 (20) は楕円体の短軸の長さを表し、最低どのくらいの出力が得られるかを示す。また、式 (21) は長軸と短軸の比を表してどのくらいバランス良く出力ができるかを示す。w_r は条件数の逆数となっている。

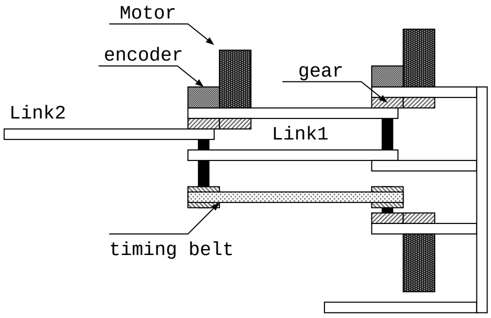


Fig.3 Outline view of robot arm design

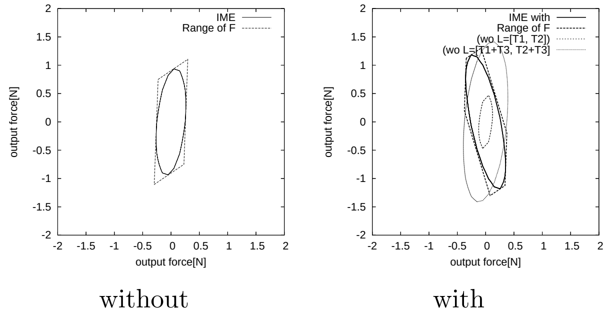


Fig.5 IME and Range of Output Force acting on an Object with or without Bi-articular Muscles

Fig.4 A photo of robot arm

3. 二関節同時駆動機構を用いたロボットアーム

Fig. 3 に二関節同時駆動機構を用いたロボットアームの概略図を示す。本ロボットは生物の 3 つの拮抗対を 3 つのモータで置き換えた 2 リンクのロボットアームで、水平面内のみを移動する。Motor1 及び Motor2 は一関節筋の拮抗対に相当し、R1, R2 の各軸を独立に駆動する。従来のロボットアームはこの 2 個のアクチュエータのみ備えるといえる。一方 Motor3 はプーリとタイミングベルトからなる二関節同時駆動機構によって、両関節を同時に駆動し、生物の二関節筋の模擬となっている。図中 R1 側の関節においては、同一軸上には存在するがアームの関節軸とは切り離されている。R2 側においては、軸に対して固定されている。

Fig. 4 に、実際に制作したロボットアームを示す。強度上の問題から、二関節同時駆動機構はリンク 1 中に折り畳まれており、R1 側はベアリングによってアームの R1 軸上を自由に動ける状態になっている。

4. 各指標の検証と二関節同時駆動機構を用いたアームの評価

4·1 検証及び評価に用いるモデル

ここでは検証として 2 リンクマニピュレータを考える。二つの関節に対し 3 つのアクチュエータを持ち、内一つは各関節を跨って同時に駆動する二関節筋に相当するアクチュエータである。よってアクチュエータ配列の行列 $\boldsymbol{A_{lign}}$ は式 (22) のように表わすことができる。

$$\boldsymbol{A_{lign}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \tag{22}$$

性能評価としては、各アクチュエータの最大トルクの和が等しくなる条件で、従来型アーム ($\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(1,1)$) と二関節筋に相当するアクチュエータを持つアームについて検証する。後者はケース 1 として $\boldsymbol{L_{act1}} = \mathrm{diag}(2/3, 2/3, 2/3)$、ケース 2 として $\boldsymbol{L_{act2}} = \mathrm{diag}(1/2, 1/2, 1)$ という制限値を持つアームを想定する。アームのリンク長、重量については特に断わりのない限り $l_1 = l_2 = 1.0$[m]、$m_1 = 1.0$[kg]、$m_2 = 0.5$[kg] とし、リンクは一様な厚みや幅のない棒として考える。

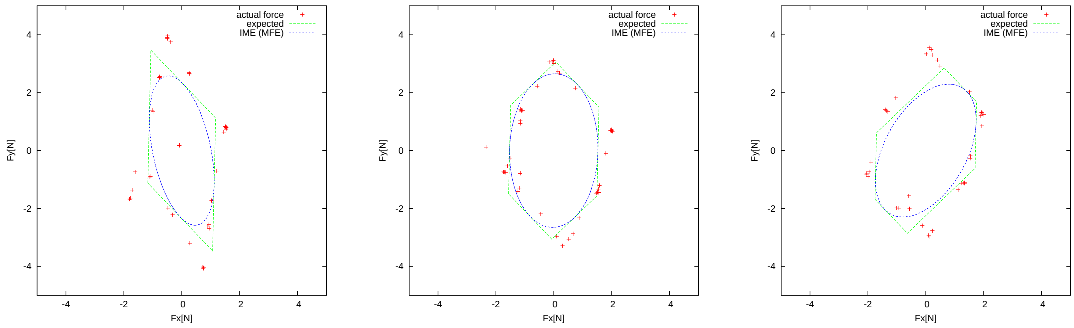
4·2 拡張した IME の検証

次に式 (12) で示される拡張されたインピーダンスマッチング楕円体の検証を行なう。把持物体に与える力の領域は式 (23) より直接求めて比較する。

$$\boldsymbol{F_e} = \boldsymbol{Q}^{\dagger}\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{F_{bias}} \tag{23}$$

ここで把持物体の質量を 0.5kg とし、水平面内で静止した状態を考える。この時 $\boldsymbol{F_{bias}}$ 項は 0 となる。IME も同様に従来のアーム $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(1,1)$ の把持物体に与える力の取りうる領域と IME の関係を図 5 の左図に示す。関節角は同様に $\boldsymbol{\theta} = [30°, 60°]$ である。一方二関節筋に相当するアクチュエータを備えるアーム $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1)$ についても図 5 の右図に示す。IME はそれぞれ把持物体に与える力の取りうる領域に内接し、うまく二関節筋を備えるアームの特徴を示していると言える。従来の指標を用いた場合は出力の大きさや方向をうまく表すことができない。内側の楕円は $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(\tau_1, \tau_2)$ とした場合、外側の楕円は $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(\tau_1 + \tau_3, \tau_2 + \tau_3)$ とした場合であり、それぞれ二関節筋を無視した場合、二関節筋の発生させるトルクが各軸を独立に駆動できるとした場合に相当する。

図 6 に、二関節同時駆動機構を備えたロボットアームの手先出力を実際に測定し、操作性指標によって評価する。実験は手先を力センサに固定し、各方向への最大力で 40 点出力して計測する。ロボットアームの諸元は $l_1 = l_2 = 0.185$m とし、各アクチュエータの最大トルクの和を 0.6N に揃えて比較する。この結果拡張した操作性指標がうまくアームの特性をとらえていることを確認できた。

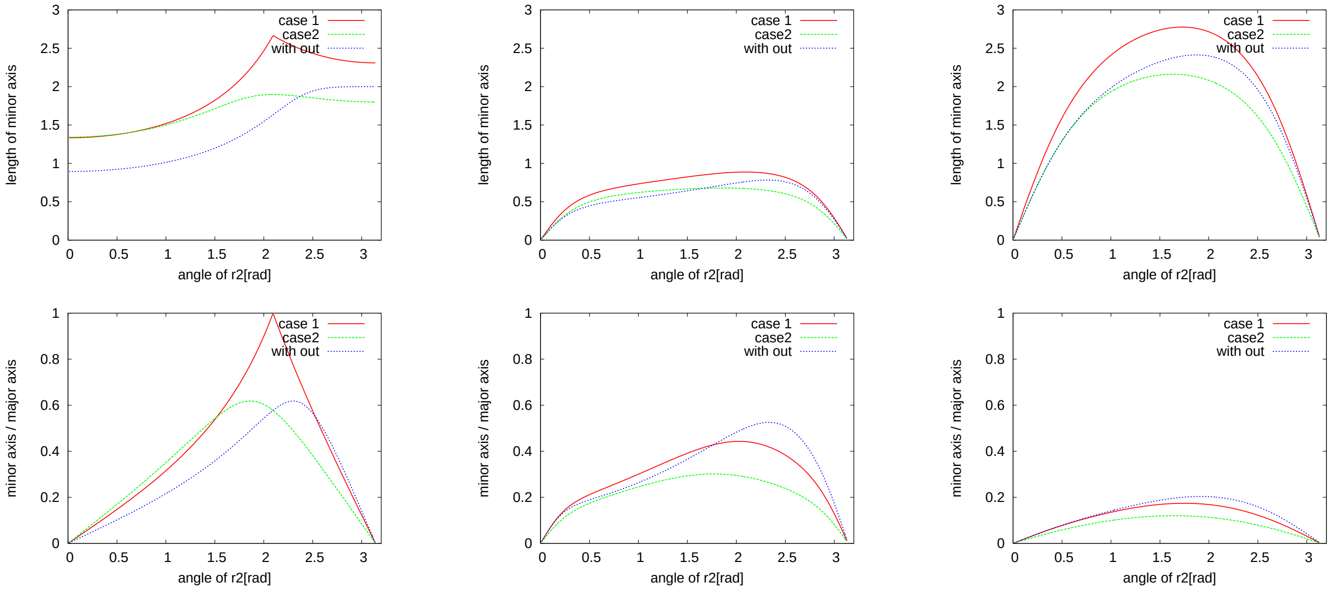


without bi-articular muscles $\boldsymbol{L_{act}} = \mathrm{diag}(0.3, 0.3)$

with bi-articular muscles $\boldsymbol{L_{act}} = \mathrm{diag}(0.2, 0.2, 0.2)$

with bi-articular muscles $\boldsymbol{L_{act}} = \mathrm{diag}(0.15, 0.15, 0.3)$

Fig.6 Experimental Result of Output Force of Robot Arm Equipped with Bi-articular Driving Mechanism



MFE IME DME

Fig.7 Comparison of Manipulability of the Arm with Bi-articular Muscles

4·3 二関節筋を持つアームの性能評価

二関節筋を持つアームと従来のアームについて 3 つの楕円体から式 (19)〜(21) の指標に関して性能評価を行なう。各アームについて θ_1 を固定して、θ_2 を 0 から π まで変化させて各指標がどのように変化するかを調べる。楕円体の面積に関しては同一の姿勢の条件ではケース 1 では従来型のアームに比べ 1.5 倍, ケース 2 でも 1.2 倍となる。図 7 に楕円体の短軸 w_m、楕円体の短軸と長軸の比 w_r を MFE,IME,DME それぞれについて示す。負荷が大きい場合は、θ_2 が大きい時、つまり腕を曲げた姿勢において全方位により均等に力が出せるようになっていることが分かる。負荷が小さい場合は、比 w_r の指標は下回るが、短軸 v_m の指標は悪化しないため、特定の方向により加速できるようになっている。

5. まとめ

本論文では拡張した操作性指標を示し、これが二関節同時駆動機構のように複数の関節を同時に駆動するアクチュエータを備えたアームの特性をうまく表わすことができることを示した。

[1] Ryo Kurazume and Tutomu Hasegawa: “Impedance matching for a serial link manipulator”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2004

[2] 熊本 水頼: “ヒューマノイド工学”, 東京電機大学出版局, 2006

[3] Kengo Yoshida, Naoki Hata, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori: “A Novel Design and Realization of Robot Arm Based on the Principle of Bi-articular Muscles”, Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2006. 12