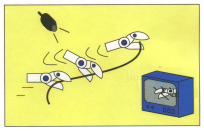
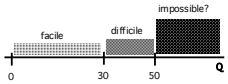
Facultés de Technologies Industrielles (TIN),
et Formation En Emploi (FEE)
Filières microtechniques et électronique et automatisation industrielle (MI et EAI)
LaRA - Laboratoire de Robotique et Automatisation

ROBOTIQUE ET AUTOMATISATION INDUSTRIELLES





Jean-Daniel Dessimoz

4.2 CONCEPTION DE LA MECANIQUE D'UN BRAS MANIPULATEUR (chaîne cinématique)

HAUTE ÉCOLE D'INGÉNIERIE ET DE GESTION DU CANTON DE VAUD
www.heig-vd.ch
Institut d'Automatisation Industrielle LaRA
Laboratoire de Robotique et Automatisation
Hes·so Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale

Cours de Robotique et Automatisation

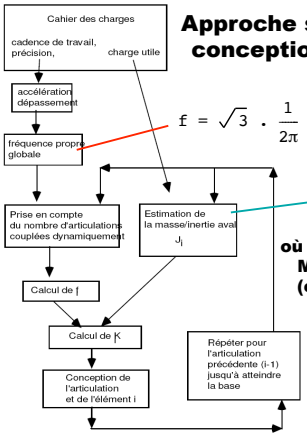
1. Concepts généraux
2. Cinématique
3. Commande
4. **Chapitres choisis**

Jean-Daniel Dessimoz
HAUTE ÉCOLE D'INGÉNIERIE ET DE GESTION DU CANTON DE VAUD
www.heig-vd.ch
Institut d'Automatisation Industrielle LaRA
Laboratoire de Robotique et Automatisation
Hes·so Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale

TECHNIQUES "AVANCÉES" D'AUTOMATISATION

4.1 Automatisation d'une opération de production
4.2 Conception de la mécanique d'un bras manipulateur
4.3 Sens tactile (capteurs de force et de moments)
4.4 Vision par ordinateur
4.5 Modélisation géométrique tridimensionnelle
4.6 Méthodes de l'intelligence artificielle pour la génération de plans d'action

Approche systématique pour la conception d'un bras (cf pt 7)



$$f = \sqrt{3} \cdot \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\text{accélération}}{\text{erreur max. admissible}}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{M}}$$

où
M est la charge entraînée (charge utile et éventuels éléments avals)

Rotation: $f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_\alpha}{I}}$

4.2 CONCEPTION DE LA MECANIQUE D'UN BRAS MANIPULATEUR (chaîne cinématique)

- **Facteurs limitant la précision d'un bras manipulateur:**
  - **fréquence propre**
  - **jeux**
  - **coincements**
  - **caractéristiques de frottement (broutage, "stick-slip")**
  - **loi de commande, etc.**
- **Fréquence propre:**
  - **rôle important liée à la mécanique du bras**
  - **au centre de cette partie du cours**
  - **définition:**

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{M}}$$

  ou, en cas de rotation:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_\alpha}{I}}$$

- **Lois de similitude:**
  - **fréquence élevée (bonne précision) si les dimensions sont faibles.**
- **Facteur de qualité d'un robot:**
  - **utile pour juger de la faisabilité/qualité d'une construction**
  - **tient compte tout à la fois de la fréquence propre et des dimensions du robot:**
  - **Q = f x L où L est la "portée" du robot.**

4.2 Conception de la mécanique d'un bras manipulateur (chaîne cinématique)

1. **Introduction**
2. **Raideur en mécanique**
3. **Masses et inerties**
4. **Fréquence propre**
5. **Lois de similitude**
6. **Facteur de qualité**
7. **Approche systématique pour la conception d'un bras**

4.2 Conception de la mécanique d'un bras manipulateur (chaîne cinématique)

1. **Introduction**
2. Raideur en mécanique
3. Masses et inerties
4. Fréquence propre
5. Lois de similitude
6. Facteur de qualité
7. Approche systématique pour la conception d'un bras

1. Introduction

- Peu de méthodes pour concevoir une chaîne cinématique
- Problème particulier: difficile d'augmenter simultanément précision et cadence de travail
  - Plus de précision: éléments très raides et massifs
  - Cadences plus élevées: éléments plus légers, impliquant des raideurs moindres.
- Caractéristique technique essentielle pour guider la construction: fréquence propre
- Il existe des relations entre f et:
  - propriétés dynamiques et de précision du cahier des charges,
  - propriétés inertielles et de raideur de la construction.
- **Attention:** Seule, une fréquence propre élevée ne suffit pas:
  - faire l'étude en statique (couple/force maximal)
  - limiter les jeux
  - éviter les coincements
  - limiter le frottement
  - éviter le broutage, ("stick-slip")
  - adopter une loi de commande "douce", etc.

4.2 Conception de la mécanique d'un bras manipulateur (chaîne cinématique)

1. Introduction
2. **Raideur en mécanique**
3. Masses et inerties
4. Fréquence propre
5. Lois de similitude
6. Facteur de qualité
7. Approche systématique pour la conception d'un bras

2. Raideur en mécanique

2.1 Raideur linéaire et angulaire
2.2 Mise en série et parallèle
2.3 Raideur des matériaux
2.4 Raideur des actionneurs et transmissions

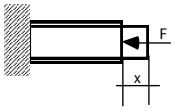
2. Raideur en mécanique

2.1 Raideur linéaire et angulaire
2.2 Mise en série et parallèle
2.3 Raideur des matériaux
2.4 Raideur des actionneurs et transmissions

2.1 Raideur linéaire et angulaire

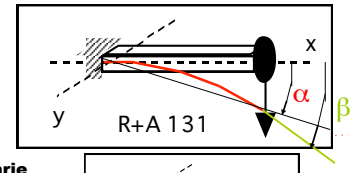
Raideur linéaire...:

K= dF/dx; ou simplement:
K= F/x [N/m]

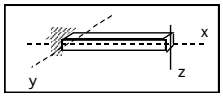


... et angulaire:

K_α = dC/dα; ou K_α = C/α
[Nm/rad]



Attention!: La raideur varie suivant l'axe considéré



2. Raideur en mécanique

2.1 Raideur linéaire et angulaire
2.2 Mise en série et parallèle
2.3 Raideur des matériaux
2.4 Raideur des actionneurs et transmissions

2.2 Mise en série et parallèle

- **Mise en parallèle ...**
- **$R_{éq}$=R1+R2+R3...**

- **... et en série:**
- **$1/R_{éq}$=1/R1+1/R2+1/R3...** >-----<
- **Attention: un élément faible ne peut être compensé**

2. Raideur en mécanique

2.1 Raideur linéaire et angulaire
2.2 Mise en série et parallèle
2.3 Raideur des matériaux
2.4 Raideur des actionneurs et transmissions

2.3 Raideur des matériaux

- **dépend de la géométrie et du matériau (cf. cours de RésMat)**
- **module d'élasticité (ou module de Young):**

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \qquad E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

- **où σ : contrainte normale, et ε : allongement relatif.**

E_{alu}= 0.75 10^{11} Pascal
E_{acier}= 2.1 10^{11} Pascal

$E/\rho \approx$ **constant, quel que soit le matériau**

- **Différences pratiques:**
prix, volume, structure: ex.: ●O

2. Raideur en mécanique

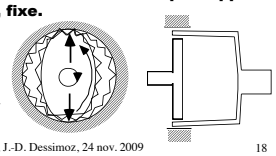
2.1 Raideur linéaire et angulaire
2.2 Mise en série et parallèle
2.3 Raideur des matériaux
2.4 Raideur des actionneurs et transmissions

2.4 Raideur des actionneurs et transmissions

- **Transmissions par éléments solides (câbles, barres, chaîne, pignons, etc.): cf raideur des matériaux**
- **Cas des réducteurs harmoniques (harmonic drive):**
  - **Entrée au centre,**
  - **avec entraînement en rotation d'un roulement elliptique,**
  - **qui déplace deux points de contacts sur une cloche déformable (sortie),**
  - **forçant ainsi la cloche à tourner lentement par rapport à la couronne extérieure, fixe.**

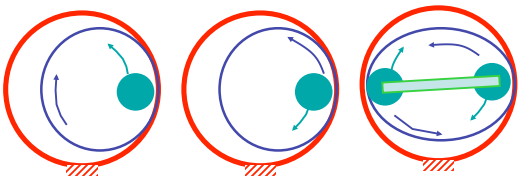
$K_\alpha = 150\ 10^6\ D^3$

où D est le diamètre extérieur



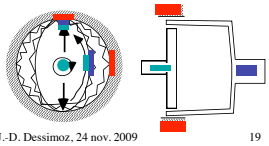
http://www.harmonicdrive.de/contenido/cms/front_content.php?idart=52

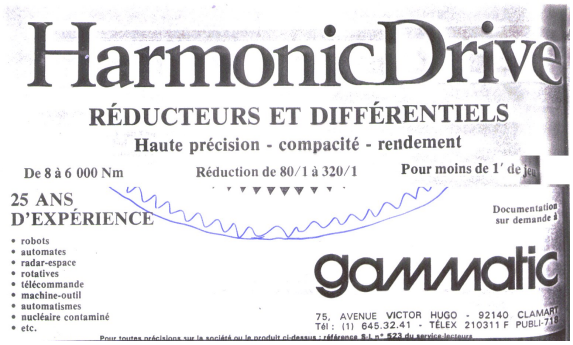
2.4 Raideur des actionneurs et transmissions



$K_\alpha = 150\ 10^6\ D^3$

où D est le diamètre extérieur





HarmonicDrive

RÉDUCTEURS ET DIFFÉRENTIELS

Haute précision - compacité - rendement

De 8 à 6 000 Nm — Réduction de 80/1 à 320/1 — Pour moins de 1′ de jeu

25 ANS D'EXPÉRIENCE

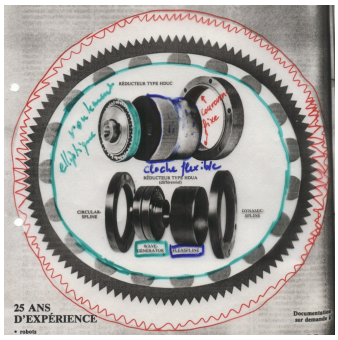
- robots
- automates
- radar-espace
- rotatives
- télécommande
- machine-outil
- automatismes
- nucléaire contaminé
- etc.

Documentation sur demande à

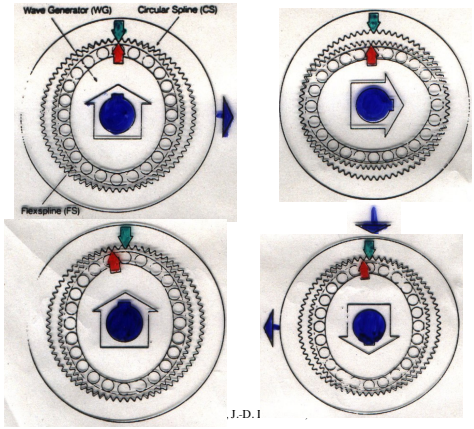
gammatic

75, AVENUE VICTOR HUGO - 92140 CLAMART
Tél : (1) 645.32.41 - TÉLEX 210311 F PUBLI-716

Pour toutes précisions sur la société ou le produit ci-dessus : référence S.I. n° 523 du service lecteurs



cf http://www.gammatic.com



robotics news — IEEE SPECTRUM

25 October 2016

SRI Unveils Abacus Drive, the First New Rotary Transmission Design in 50 Years

Robot makers frequently use harmonic gears in their designs because they are compact, offer high gear ratios, and have no backlash. But harmonic gears are also expensive, significantly increasing the cost of robots. Now SRI International in Silicon Valley has demonstrated a novel kind of reduction gear system called the Abacus drive. SRI says it's the first new rotary transmission design since Harmonic Drive gears were introduced in the 1960s. It's a beautiful piece of clever engineering that promises all kinds of substantial advantages, including lower cost compared to conventional high-performance gears.

DURUS: SRI's Ultra-Efficient Walking Humanoid Robot

By Evan Ackerman [/author/ackerman-evan-]
Posted 16 Jun 2016 | 17:05 GMT

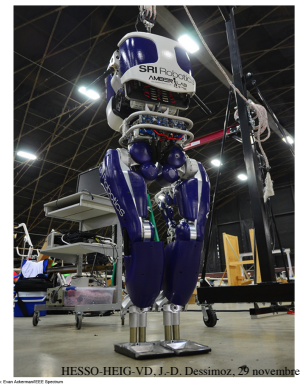
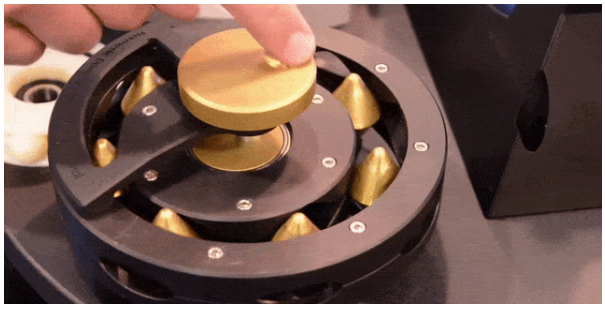
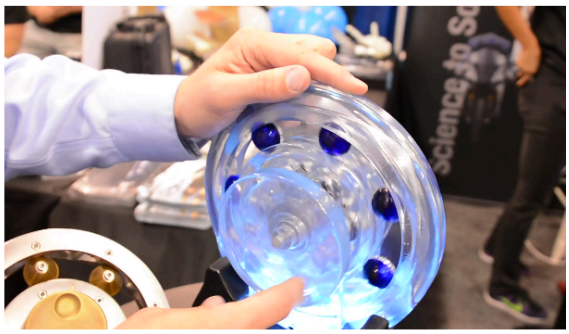


Photo: Evan Ackerman/IEEE Spectrum



http://www.popularmechanics.com/technology/a23489/sri-abacus-rotary-transmission/

https://youtu.be/bzRh672peNk



Cas des liquides

Constante de compressibilité, B.

$-\Delta V/V = \Delta r/r = \Delta P/B$,

où V: volume; r: densité; P: pression.

Valeur typique:

$B = 1.3\ 10^9$ Pascal = $1.3\ 10^4$ bar

Attention:

- **B chute de 50% pour 1% d'air dans le liquide**
- **élasticité de l'*enveloppe***

Vérin linéaire

K=(4 B s2)/Vt [N/m]
où s est la section et Vt le volume total d'huile

Vérin rotatif

K_α =(4 B Cyr^2)/Vt [Nm/rad]
où Cyr = l (R^2-r^2)/2, avec l : l'épaisseur du cylindre, R: rayon extérieur et r : rayon intérieur.

Moteurs électriques

K_α =Cmax/pmin; ou K_α =n Cmax/2π;
où Cmax: couple maximal du moteur, et pmin : plus petit pas possible (moteur PAP; ou moteur CC avec capteur angulaire à n positions).

Exemple: $K_\alpha = \frac{C}{\alpha} = \frac{0.1 \cdot 150}{2\pi} \cong 2.50 [Nm/rad]$

4.2 Conception de la mécanique d'un bras manipulateur (chaîne cinématique)

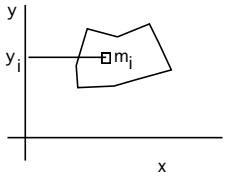
1. Introduction
2. Raideur en mécanique
3. **Masses et inerties**
4. Fréquence propre
5. Lois de similitude
6. Facteur de qualité
7. Approche systématique pour la conception d'un bras

3. Masses et inerties

Notion de "masse" bien connue : kilogrammes [kg]
Inertie: moment d'ordre 2

-Cas général:

$$J_X = \sum_i^n m_i y_i^2 \quad [kg\ m^2]$$



- Inertie d'une masse ponctuelle:
J = M d^2 où d : distance masse-axe
-En cas de reduction n:
J'=n^2 J

4.2 Conception de la mécanique d'un bras manipulateur (chaîne cinématique)

1. Introduction
2. Raideur en mécanique
3. Masses et inerties
4. **Fréquence propre**
5. Lois de similitude
6. Facteur de qualité
7. Approche systématique pour la conception d'un bras

4. Fréquence propre

f dépend:
- du système (raideurs, masses),
- de la direction,
- du mode (harmoniques...)
- et du type de mvmt (transl. ou rot.)

4.1 Relation avec masses et raideurs
4.2 Cas des systèmes couplés
4.3 Relation avec rapidité et précision

4. Fréquence propre

4.1 Relation avec masses et raideurs
4.2 Cas des systèmes couplés
4.3 Relation avec rapidité et précision

4.1 Relation avec masses et raideurs

•- f d'un oscillateur linéaire:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{M}}$$

•- f d'un oscillateur angulaire:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_\alpha}{J}}$$

4. Fréquence propre

4.1 Relation avec masses et raideurs
4.2 Cas des systèmes couplés
4.3 Relation avec rapidité et précision

4.2 Cas des systèmes couplés

4.1 Relation avec masses et raideurs
4.2 Cas des systèmes couplés
4.3 Relation avec rapidité et précision

$$f_r = \frac{1}{\sqrt{n}} f$$

n: nombre de systèmes couplés;
max 3 dans un même plan

4. Fréquence propre

4.1 Relation avec masses et raideurs
4.2 Cas des systèmes couplés
4.3 Relation avec rapidité et précision

4.3 Relation avec rapidité et précision

$$f_{robot} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{a}{d}}$$

où

a: accélération (commande à accélération "constante")

d : dépassement maximal admissible, (précision)

4.2 Conception de la mécanique d'un bras manipulateur (chaîne cinématique)

1. Introduction
2. Raideur en mécanique
3. Masses et inerties
4. Fréquence propre
5. Lois de similitude
6. Facteur de qualité
7. Approche systématique pour la conception d'un bras

5. Lois de similitude (1 de 2)

LS font apparaître des changements *qualitatifs* :

- **ex.: taille relative au corps des pattes de fourmis ou d'éléphants**

Cas d'un bras de robot:

- **f évolue comme l'inverse des dimensions**

Mise en oeuvre LS:

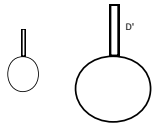
- Dans chaque équation: faire apparaître les dimensions

- Prendre le rapport des équations à deux échelles différentes

5. Lois de similitude (2 de 2)

$$D^* = \frac{D'}{D}$$

$$R^* = \frac{R'}{R}$$



$$S = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$S^* = \frac{S'}{S} = \frac{\frac{\pi D'^2}{4}}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{D'^2}{D^2} = D^{*2} = L^{*2}$$

D*=R*=L*

$$P = \frac{4}{3}\pi R^3 \bullet \rho \bullet g$$

$$P^* = \frac{P'}{P} = \frac{\frac{4\pi R'^3}{3} \bullet \rho}{\frac{4\pi R^3}{3} \bullet \rho} = \frac{R'^3}{R^3} = R^{*3} = L^{*3}$$

$K^*=L^*$; $K_\alpha=L^{*3}$; $M^*=L^{*3}$; $J^*=L^{*5}$; et $f^*=L^{*-1}$

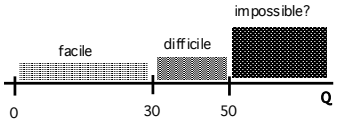
4.2 Conception de la mécanique d'un bras manipulateur (chaîne cinématique)

1. Introduction
2. Raideur en mécanique
3. Masses et inerties
4. Fréquence propre
5. Lois de similitude
6. **Facteur de qualité**
7. Approche systématique pour la conception d'un bras

6. Facteur de qualité

Indicateur de qualité ("facteur de qualité"):

- **Q = f * L [m/s]**
  où
  - f : fréquence propre la plus basse du système,
  - L : portée
- **Q* = 1**



4.2 Conception de la mécanique d'un bras manipulateur (chaîne cinématique)

1. Introduction
2. Raideur en mécanique
3. Masses et inerties
4. Fréquence propre
5. Lois de similitude
6. Facteur de qualité
7. **Approche systématique pour la conception d'un bras**

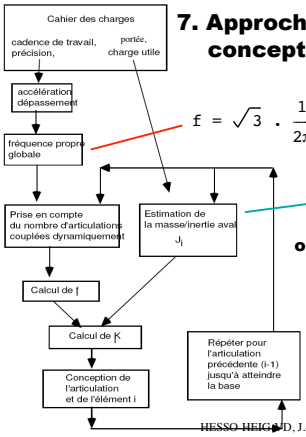
7. Approche systématique pour la conception d'un bras (1 de 3)

1. **Etablir le cahier des charges : charge utile, précision, (vitesse maximum, accélération)...**
2. $$f = \sqrt{3} \cdot \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\text{accélération}}{\text{erreur max. admissible}}}$$
   si 3 systèmes couplés
3. **Proposer le système d'entraînement de la dernière articulation. En particulier, la raideur (K) doit satisfaire la relation suivante :**
   où
   $$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{M}}$$
   où M est la charge entraînée (cf. charge utile)

7. Approche systématique pour la conception d'un bras (2 de 3)

4. **Concevoir de manière similaire, l'une après l'autre, chaque articulation jusqu'à la base**
   - **La même équation de principe est valable**
   - **Le dénominateur varie pour chaque articulation:**
     L'inertie combine la charge utile et les éléments avals
   - **Le numérateur varie pour chaque articulation:**
     La raideur à atteindre guide la conception de l'articulation en cours

7. Approche systématique pour la conception d'un bras (3 de 3)



$$f = \sqrt{3} \cdot \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\text{accélération}}{\text{erreur max. admissible}}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{M}}$$

où

M est la charge entraînée (charge utile et éventuels éléments avals)

Rotation: $f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_\alpha}{J}}$

8. Conclusion

Méthode de construction valable pour:
- **bras, jambe,**
- **chaîne cinématique**

Intérêt particulier pour le régime *dynamique*
Considérer par ailleurs les contraintes *statiques* (force/couple maximal, limites de rupture, réversibilité, etc.)
Robot à la fois précis, rapide et peu rigide?
- **Impossible, malgré le paradoxe du grutier**
- **Difficultés pour une telle commande:**
  nombre élevé de degrés de liberté
  couplages mutuels
  variations incessantes de géométrie
  variations incessantes de charge utile