

Documentation Galvanomètre

Galvanomètre :

Les systèmes basés sur les galvanomètres sont utilisés depuis un certain temps pour réaliser des opérations de balayage laser pour différentes applications : la microscopie confocale, le perçage de circuit imprimé, le marquage laser, le découpage au laser et bien évidemment la fabrication additive plus récemment. Ces systèmes sont utilisés dans des applications qui sont de plus en plus exigeantes en termes de précision et de vitesse de balayage, pour la fabrication additive par exemple le niveau de précision des pièces ne doit pas excéder des écarts supérieurs à environ $30\mu\text{m}$ par rapport à son modèle 3D avec une vitesse de balayage pour la fusion du lit de poudre classiquement réglée entre 1000mm/s et 2000mm/s .

Historiquement, le galvanomètre était un appareil de mesure analogique du courant électrique qui a vu le jour au 19^{ème} siècle. La mesure de courant repose sur le principe de mise en mouvement d'une aiguille sous l'action combinée d'un aimant et d'une bobine traversée par un courant électrique, la valeur de déplacement de l'aiguille étant reliée directement à l'intensité du courant traversant la bobine. Une graduation est mise en place afin de pouvoir lire directement la valeur de l'intensité du courant dans la bobine en fonction du déplacement de l'aiguille

Ce principe du mouvement de rotation créé par interactions de deux champs magnétiques (dont l'un est fixe et l'autre est variable) est repris dans les galvanomètres moteurs modernes (ceux qui sont utilisés dans les têtes de scanning laser). A l'instar des anciens appareils de mesures de courant, ils sont dimensionnés pour fonctionner avec précision sur une plage limitée en rotation (typiquement en dessous de ± 20 degrés). Pour les galvanomètres dans les applications laser actuelles, les paramètres principaux de performance sont le rapport couple fourni/inertie, le couple maximal délivrable, les fréquences de résonance mécanique de modes souples, les caractéristiques de répétabilité de positionnement et la durée de vie des roulements supportant la partie tournante (le rotor). On rencontre trois principales technologies de galvanomètres selon la disposition des éléments fixes et tournants

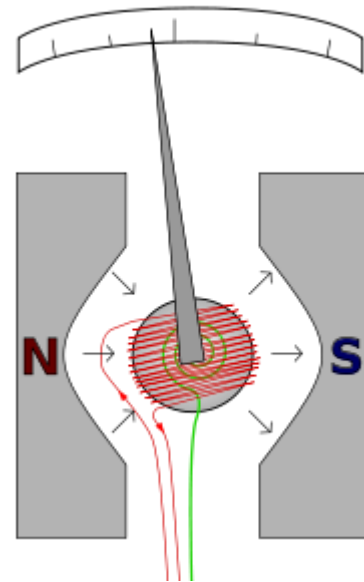


Figure 1 : galvanometre

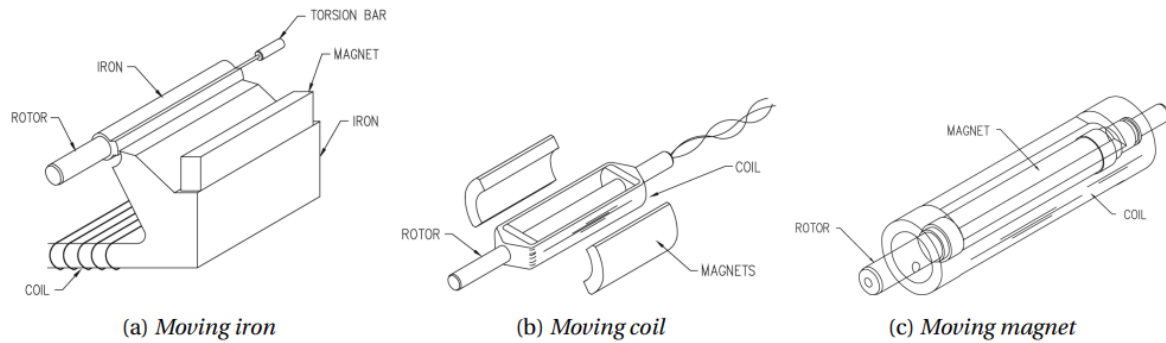


Figure 2– Les trois principales technologies de galvanomètres

-La technologie moving iron la plus ancienne, pour laquelle la partie tournante est constituée d'une barre en fer entraînée par l'action combinée d'un montage avec un aimant et une bobine. Cette technologie permet d'avoir des grands couples de positionnement mais est limitée par ses performances à haute vitesse à cause des propriétés de saturation magnétique de son rotor en fer. Sur les trois technologies présentées, celle-ci est celle qui présente le plus mauvais ordre de précision de positionnement et de stabilité ;

— la technologie moving coil Figure b pour laquelle la partie tournante est constituée par les bobines et la partie fixe (stator) par des aimants permanents. Cette technologie offre des valeurs importantes du ratio couple fourni/inertie grâce au rotor à faible inertie étant composé de bobines. Elle permet d'obtenir la plus grande précision de positionnement sur les trois technologies avec de bonnes performances de répétabilité et de stabilité autant sur le court que le long terme;

— la technologie moving magnet Figure c'est la technologie la plus rencontrée pour les galvanomètres dans les têtes de scanning actuelles. Dans ces galvanomètres, le rotor est constitué d'un aimant permanent tandis que le stator est constitué de bobines. La première raison du succès de cette technologie est le fait qu'elle présente les vitesses de fonctionnement les plus élevées par rapport aux deux technologies précédentes. Cela est dû à la caractéristique rigide de son rotor en aimant permanent qui résulte en des valeurs de fréquences de résonance mécanique des modes souples élevées donc une meilleure bande passante en boucle fermée asservie

Les modèles des galvanomètres moteurs sont le point de départ de la synthèse des structures d'asservissement en position angulaire pour respecter les exigences de précision et de rapidité des applications industrielles. Il est donc tout à fait naturel que ces modèles se doivent d'être les plus fidèles possibles par rapport à l'élément réel, en gardant une complexité raisonnable pour la synthèse de loi de commande et la simulation. Dans le cadre de ce travail de thèse, l'amélioration de la fidélité de ces modèles est recherchée. La précision de ces modèles impacte directement la fiabilité du simulateur final pour l'opération de fusion laser sélective par le système de scanning 3 axes.

D'une manière générale, il existe deux catégories de modèles qu'il est possible de mettre en œuvre pour un système quelconque : — les modèles de connaissance qui sont mis en place à partir de la connaissance des phénomènes physiques mis en jeu dans le système, ce type de modèle est paramétré par des grandeurs qui représentent directement des grandeurs physiques du système (par exemple : une résistance électrique, un moment d'inertie), les techniques permettant de mettre œuvre des modèles de connaissance sont des techniques de modélisation; — les modèles de comportement qui sont mis en place quand les connaissances sur le système sont limitées (boîte noire) et qu'on veut représenter uniquement le comportement entre certaines grandeurs particulières au sein du système sans forcément en connaître les interactions physiques. La

méthode mise en œuvre consiste à affecter au système une expression conventionnelle (par exemple les fonctions de transfert, réponse fréquentielle sous forme de signal complexe) et rechercher une paramétrisation fidèle qui permet de faire reproduire au modèle le comportement du système réel, on parle alors d'identification. Il existe dans la littérature des modèles de connaissance et des modèles de comportement pour les galvanomètres. Les modèles de connaissance sont les plus rencontrés car les galvanomètres sont assimilés la majorité du temps à des machines à courant continu pour lesquels les phénomènes physiques peuvent être décrits d'une manière classique. Pour cela, le point de départ est le schéma équivalent électrique et mécanique de la Figure

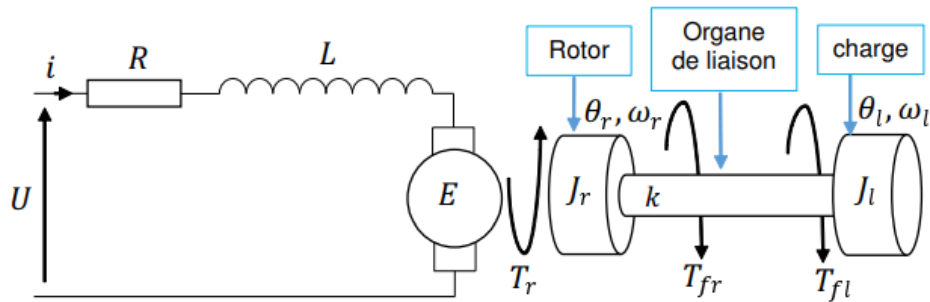


Figure 3 Schéma équivalent électrique et mécanique pour un galvanomètre

Les paramètres du schéma équivalent sont :

— pour la partie électrique

— U : la tension aux bornes du moteur (des bobines dans le cas des galvanomètres moving magnet)

— i : le courant traversant les bobines (le stator)

Les paramètres du schéma équivalent sont :

— pour la partie électrique

— U : la tension aux bornes du moteur (des bobines dans le cas des galvanomètres moving magnet)

— i : le courant traversant les bobines (le stator)

Par application de l'équation d'équilibre des potentiels électriques et le principe fondamental de la dynamique en rotation, les équations sont obtenues à partir du schéma équivalent de la Figure précédente.

$$\begin{cases} U = Ri + L \frac{di}{dt} + E \\ J_r \frac{d^2\theta_r}{dt^2} = T_r - T_{fr} - k(\theta_r - \theta_l) \\ J_l \frac{d^2\theta_l}{dt^2} = k(\theta_r - \theta_l) - T_{fl} \end{cases}$$

Figure 4 equation 2.1

Les modèles de connaissance dans la littérature pour réaliser la synthèse des asservissements des galvanomètres ont pour point de départ les équations (2.1). Des hypothèses simplificatrices sont acceptées pour déduire des équations (2.1) le modèle le plus classiquement utilisé dans la littérature pour le galvanomètre :

1. la liaison rotor - charge est une liaison rigide ($k \rightarrow \infty$) donc $\theta_r = \theta_l = \theta$, l'ensemble des inerties du rotor et de la charge sont ramenées au rotor et noté J_{eq}
2. les frottements au niveau de la charge sont négligeables : ce sont les frottements de l'air
3. les frottements au niveau du rotor sont réduits au frottement visqueux, proportionnel à la vitesse de rotation tel que $T_f r = B \cdot \omega$ avec B le coefficient de frottement visqueux au rotor et ω la vitesse de rotation du rotor et de la charge ($\omega = \dot{\theta}_r = \dot{\theta}_l$ en conséquence du point 1.)

Suite à ces hypothèses simplificatrices, les équations deviennent :

$$\begin{cases} U = Ri + L \frac{di}{dt} + K_e \frac{d\theta}{dt} \\ J_{eq} \frac{d^2\theta}{dt^2} = K_c \cdot i - B \frac{d\theta}{dt} \end{cases}$$

Figure 5 equation 2.2

et par transformée de Laplace (la variable de Laplace est notée s), le modèle de moteur galvanomètre le plus utilisé dans la littérature sous forme d'une fonction de transfert d'ordre 3 entre la position θ et la tension moteur U est obtenue :

$$\frac{\theta}{U}(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{K_c}{(sL + R)(sJ_{eq} + B) + K_c K_e}$$

Figure 6 equation 2.3

Ce modèle de connaissance est le plus utilisé pour modéliser les galvanomètres dans les applications laser pour le perçage des circuits imprimés et pour des applications d'imagerie médicale (microscopie confocale). Il arrive qu'on rencontre des modèles approximatifs obtenus réécrits sous la forme :

$$\frac{\theta}{U}(s) \simeq \frac{1}{s} \cdot \frac{K_{reduit}}{(1 + \tau_e s)(1 + \tau_m s)}$$

Figure 7 équation 2.4

Le modèle (2.4) fait apparaître τ_e et τ_m qui sont respectivement des approximations des constantes de temps électrique et mécanique du galvanomètre. Elles sont approximées la majorité du temps par les expressions $\tau_e \approx L/R$ et $\tau_m \approx J_{eq}/B$. En outre, K_{reduit} est un paramètre de gain qui prend la valeur du gain statique de (2.3), c'est-à-dire

$$K_{reduit} = \frac{K_c}{B \cdot R + K_c K_e}$$

Dans certains cas, le modèle du galvanomètre peut être simplifié encore plus pour être ramené à une fonction de transfert d'ordre deux en négligeant les effets de la dynamique électrique (très rapide) devant les effets de la dynamique mécanique. Ce modèle simplifié est décrit tout simplement par :

$$\frac{\theta}{U}(s) \simeq \frac{1}{s} \cdot \frac{K_{\text{reduit}}}{(1 + \tau_m s)}$$

Figure 8 : 2.5

Les modèles décrits par les fonctions de transfert (2.3), (2.4) et (2.5) sont les plus utilisés dans la littérature pour des besoins de synthèse de structure de commande. Le problème est que pour des besoins de simulation, ils ne sont pas assez représentatifs. Leur domaine fréquentiel de validité par rapport à l'élément réel est restreint et ne tient pas compte des phénomènes de frottements mécaniques qui ont une influence surtout en basses fréquences. Les modes souples en torsion de la liaison rotor - charge ne sont pas non plus pris en compte dans ces modèles, or, il est nécessaire d'intégrer ces phénomènes en hautes fréquences pour l'augmentation de la bande passante (en vue de l'augmentation de la rapidité) du système asservi. Même s'ils ne sont pas très nombreux, des travaux existent pour élargir la bande fréquentielle de validité du modèle de galvanomètre.

une représentation dans laquelle la liaison rotor - charge n'est plus considérée rigide donc le module d'élasticité k est pris en compte et un paramètre de pulsation de résonance ω_{res} est défini

. La nouvelle expression de la fonction de transfert entre l'angle du rotor θ_r et le courant moteur i proposé par MIRTICHEV et al.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\theta_r}{i}(s) = \frac{K_c}{J_r} \cdot \frac{s^2 + a}{(s^2 + aJ_l/J_r)(s^2 + a) - a^2J_l/J_r} \\ a = \omega_{res}^2 J_l/J_r \\ \omega_{res} = \sqrt{\frac{k(J_r + J_l)}{J_r \cdot J_l}} \end{array} \right.$$

niveaux de modèles et introduction de la représentation par schéma-bloc :

le modèle de connaissance le plus utilisé pour modéliser le galvanomètre est la fonction de transfert (2.3), sa mise sous forme de schéma-bloc est donnée Le moteur galvanomètre est commandé par une tension électrique U pour réaliser un positionnement angulaire désiré θ , on se réfèrera à ce modèle comme le modèle de base. On illustre les améliorations apportées dans le cadre de ce travail de thèse sur ce modèle de base. Ces améliorations sont présentées au fur et à mesure avec les nouvelles briques apportées au schéma-bloc de base.

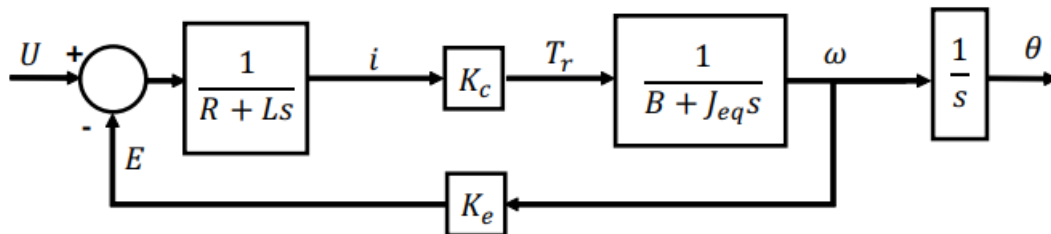


Figure 9 :

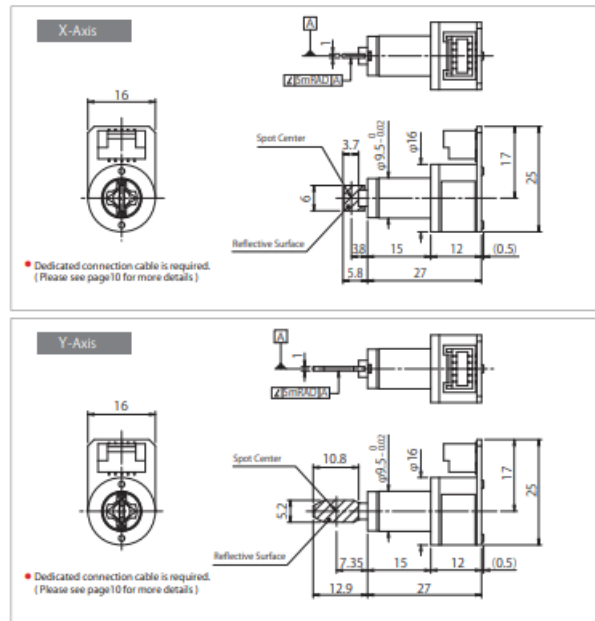
Comparaison technico-commerciale des galvanomètres :

GVM-0930S



■ This drawing indicates the combination of GM7 mirror assembly

(Unit : mm)



Connector Pin Sequence

| SM10B-ZPDSS-TF (J.S.T.) | |
|-------------------------|-----------------|
| Pin No. | Function |
| 1 | A |
| 2 | B |
| 3 | PD COM |
| 4 | AGC RETURN |
| 5 | AGC IN |
| 6 | SHIELD |
| 7 | SHIELD |
| 8 | SHIELD |
| 9 | - MOTOR WINDING |
| 10 | + MOTOR WINDING |

Specifications

| Items | Unit | GVM-0930S |
|---------------------------------------|-------------------|--------------|
| Maximum Scan Angle (Mechanical Angle) | deg mech. | ± 20 |
| Rotor Inertia | g·cm ² | 0.012 |
| Coil Resistance | Ω | 2.5 ± 10% |
| Coil Inductance | mH | 0.054 ± 10% |
| Torque Constant | mN·m/A | 1.28 ± 10% |
| Back EMF Voltage | mV/deg/sec | 0.0224 ± 10% |
| Peak Current | A | 9 |
| Maximum Coil Temperature | °C | 110 |
| Weight | g | 15 |

| | | |
|----------------------|-------------------|--------------------------------|
| Repeatability | μrad | 8 |
| Non-Linearity (±10°) | % | 0.1 (Maximum) |
| Offset Drift | μrad/°C | 10 (Maximum) |
| Gain Drift | ppm/°C | 50 (Maximum) |
| Step Response Time | μsec | *Please see the cautions below |
| Output Signal | Common Mode | 421 |
| | Differential Mode | 14.1 |
| Input Signal | mA | 30 |

* The values of the specification are based on the combination of Citizen Chiba Precision Servo Driver and Mirror.

* All angles shown are in mechanical angles.

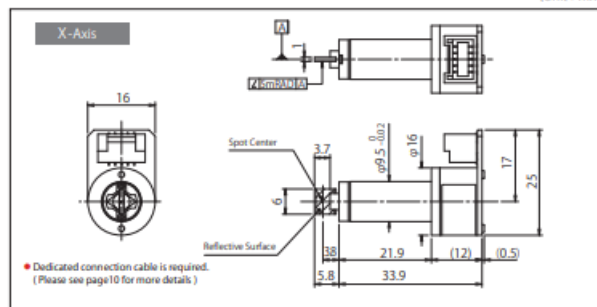
* We can provide the data including step response time by preferred combination of the mirror size and the scanner. Please contact our sales representatives for more details. (Some combinations may not be available.)

GVM-0930L



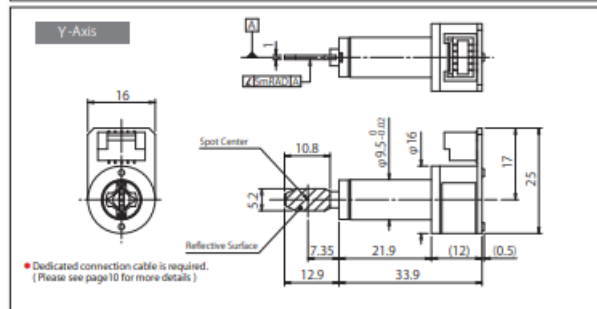
■ This drawing indicates the combination of GM7 mirror assembly

(Unit : mm)



Connector Pin Sequence

| SM10B-ZPDSS-TF (J.S.T.) | |
|-------------------------|-----------------|
| Pin No. | Function |
| 1 | A |
| 2 | B |
| 3 | PD COM |
| 4 | AGC RETURN |
| 5 | AGC IN |
| 6 | SHIELD |
| 7 | SHIELD |
| 8 | SHIELD |
| 9 | - MOTOR WINDING |
| 10 | + MOTOR WINDING |



Specifications

| Items | Unit | GVM-0930L |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------------------|
| Maximum Scan Angle (Mechanical Angle) | deg mech. | ± 20 |
| Rotor Inertia | g · cm ² | 0.016 |
| Coil Resistance | Ω | 1.9 ± 10% |
| Coil Inductance | mH | 0.052 ± 10% |
| Torque Constant | mN · m/A | 1.9 ± 10% |
| Back EMF Voltage | mV/deg/sec | 0.0338 ± 10% |
| Peak Current | A | 10 |
| Maximum Coil Temperature | °C | 110 |
| Weight | g | 18 |
| Repeatability | μrad | 8 |
| Non-Linearity (± 10°) | % | 0.1 (Maximum) |
| Offset Drift | μrad/°C | 10 (Maximum) |
| Gain Drift | ppm/°C | 50 (Maximum) |
| Step Response Time | μsec | *Please see the cautions below |
| Output Signal | Common Mode | μA |
| | Differential Mode | μA/deg |
| Input Signal | | mA |

* The values of the specification are based on the combination of Citizen Chiba Precision Servo Driver and Mirror.

* All angles shown are in mechanical angles.

* We can provide the data including step response time by preferred combination of the mirror size and the scanner. Please contact our sales representatives for more details.
(Some combinations may not be available).

Single-Axis Galvanometer Scanners

62xxH Series

| Product Specifications | 6200H | 6210H | 6215H | 6220H | 6230H | 6231H | 6240H | 6250H | 6260H |
|---|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Recommended Aperture Size (mm) | 3 to 7 | 3 to 7 | 3 to 7 | 5 to 10 | 8 to 15 | 8 to 15 | 12 to 25 | 25 to 75 | 30 to 100 |
| Wavelength Options | 355 nm / 532 nm / 1030 nm - 1080 nm / 9.4 μ m - 10.6 μ m Broadband Coatings: 350 nm – 12 μ m | | | | | | | | |
| Maximum Scan Angle (degrees) | 40° | | | 40° | | | 40° | | |
| Rotor Inertia (gm·cm ² , \pm 10%) | 0.013 | 0.018 | 0.028 | 0.125 | 0.97 | 0.82 | 2.4 | 15.6 | 47.5 |
| Torque Constant (dyne·cm/amp, \pm 10%) | 1.20x10 ⁴ | 2.79x10 ⁴ | 3.78x10 ⁴ | 6.17x10 ⁴ | 1.31x10 ⁵ | 1.11x10 ⁵ | 2.0x10 ⁵ | 7.08x10 ⁵ | 8.5x10 ⁵ |
| Maximum Rotor Temperature (°C) | 110° | | | 110° | | | 110° | | |
| Thermal Resistance (Rotor to Case) (°C/watt, maximum) | 3.8 | 2.0 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 1.0 | 0.62 | 0.35 | 0.2 |
| Coil Resistance (ohms, \pm 10%) | 2.14 | 3.7 | 2.5 | 2.79 | 1.07 | 1.27 | 1.03 | 1.69 | 0.60 |
| Coil Inductance (μ H, \pm 10%) | 52 | 109 | 94 | 180 | 173 | 176 | 350 | 1030 | 530 |
| Back EMF Voltage (μ V/°/sec, \pm 10%) | 20.9 | 48.7 | 66 | 108 | 229 | 195 | 346 | 1220 | 1480 |
| RMS Current (A at Tcase = 50°C, maximum) | 2.3 | 2.4 | 4.1 | 3.9 | 7.1 | 5.8 | 8.2 | 7.1 | 12 |
| Peak Current (A, maximum) | 6 | 8 | 20 | 20 | 25 | 25 | 25 | 20 | 40 |
| Small Angle Step Response ¹ (typical) | 3 mm Y mirror | | | 5 mm Y mirror | 10 mm Y mirror | | 15 mm Y mirror | 50 mm Y mirror (Be) | |
| | 130 μ s | 100 μ s | 130 μ s | 200 μ s | 250 μ s | 250 μ s | 350 μ s | 3.0 ms | 2.1 ms |
| Weight (grams, typical) | 13.3 | 18 | 25.8 | 42.5 | 267 | 142 | 356 | 590 | 1200 |

Mechanical Specifications

Rated Angular Excursion: 40°
 Rotor Inertia: 0.018 gm·cm², \pm 10%
 Torque Constant: 2.79x10⁴ dyne·cm/amp, \pm 10%
 Maximum Rotor Temperature: 110°C
 Thermal Resistance (Rotor to Case): 2°C/W

Electrical Specifications/Drive Mechanism

Coil Resistance: 3.7 Ohms, \pm 10%
 Coil Inductance: 109 μ H, \pm 10%
 Back EMF Voltage: 48.7 μ V/(deg/sec)
 RMS Current: 2.4 A at Tcase of 50°C, Max
 Peak Current: 8 A, Max
 Small Angle Step Response: 100 μ s



Shown With Mini-CT Connector

Position Detector

Linearity: 99.9 %, Minimum over 20 degrees, 99.5% Typical, over 40 degrees
 Scale Drift: 50 PPM/°C, Maximum
 Zero Drift: 15 μ rad/°C, Maximum
 Repeatability, Short Term: 8 microradians
 Output Signal, Common Mode: 155 μ A with an AGC current of 30mA, \pm 20%
 Output Signal, Differential Mode: 12 μ A/°, at common mode current of 155 μ A, \pm 20%

References :

https://ccj.citizen.co.jp/en/pdf/galvano_pdf.pdf

https://www.limpkin.fr/public/rapport_I_III.pdf

<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00234180/document>

[Datasheet - Galvos-62xxH Series-DS00003_R1_v4_1_1.pdf \(camtechfiles.s3-us-west-2.amazonaws.com\)](#)

[\(2\) \(PDF\) Transformation-based iterative learning control for non-collocated sensing of a galvanometer scanner \(researchgate.net\)](#)