

2023年度機械工学専攻

大学院修士課程入学試験問題

「機械工学」(第2部)

試験日時：2022年8月30日(火) 13:00～16:00

注意事項

1. 試験開始の合図があるまで、この問題冊子を開かないこと。
2. 問題は問題1から問題3までである。全問に解答すること。
3. 問題の落丁、乱丁、あるいは印刷不鮮明な箇所があれば申し出ること。
4. 答案用紙は6枚配付される。枚数を確認し、過不足があれば申し出ること。
5. 問題ごとに2枚の答案用紙を用いて解答すること。設問Ⅰ、Ⅱに分かれている問題は、設問ごとに1枚の答案用紙を用いて解答すること。設問Ⅲまでである場合は、問題冒頭の指示に従うこと。解答を表面で書ききれない時は、裏面にわたってもよい。なお、それでも解答するスペースが不足する場合は答案用紙を与えるので申し出ること。
6. 答案用紙の指定された箇所に、自分の受験番号、その答案用紙で解答する問題番号を記入すること。記入もれの場合は採点されないことがある。なお、科目名欄には「機械工学(第2部)」と記入すること。答案用紙の右端にある「 / of」については、答案用紙を追加しない場合は空欄のままでよい。但し答案用紙を追加した場合は、問題ごとの枚数を記載する。
7. 解答に関係のない記号や符号を記入した答案は無効となることがある。
8. 答案用紙は、解答ができなかった分も含め、全てを提出すること。
9. 下書き用紙は3枚配付される。左上に自分の受験番号を記入すること。
10. 下書き用紙は、使用しなかった分も含め、3枚全部を提出すること。
11. 問題冊子は持ち帰ってよい。

(白紙)

問題 1

下記の I, II の両方について解答せよ．なお，I の解答に答案用紙 1 枚を，II の解答に答案用紙 1 枚を，それぞれ用いること．

- I. 図 1-1 に示すように，長さ L の一様断面片持ちはり AB の B 端に，長さ $L/3$ の一様断面はり BC が直角に接続されている．はり BC の C 端には y 軸下向き方向の集中荷重 W が，片持ちはり AB の B 端の断面には x 軸方向の荷重 P が作用している．集中荷重 W が印加される前のはり BC の中心軸は z 軸に平行であり x - z 平面上にある．図 1-2 に示すように，片持ちはり AB は半径 R の円形断面形状を有し，軸方向に半径 $R/2$ の円孔があいている．片持ちはり AB の長さ L は半径 R に比べて十分に大きいとする．以下の設問に答えよ．

- (1) 片持ちはり AB の断面の I_y , I_z および I_p を求めよ．ここで， I_y , I_z は，それぞれ y 軸， z 軸に関する断面二次モーメントであり， I_p は図心 O に関する断面二次極モーメントである．
- (2) 図 1-3 は片持ちはり AB の固定端の点 a における応力状態を示したものである．点 a の垂直応力 σ_x とせん断応力 τ_{xy} を求めよ．
- (3) 片持ちはり AB の固定端の点 a における最大主応力および最大せん断応力を求めよ．

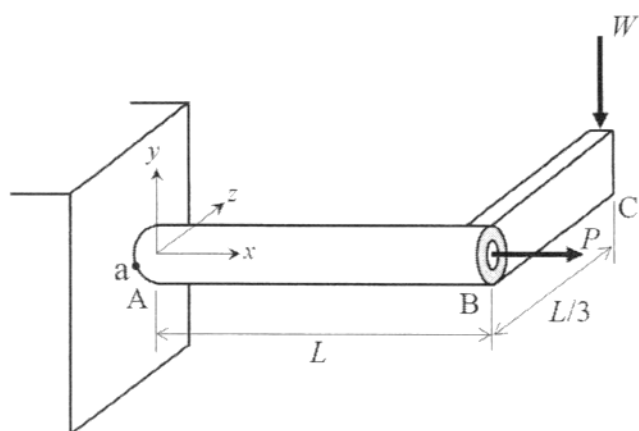


图 1-1

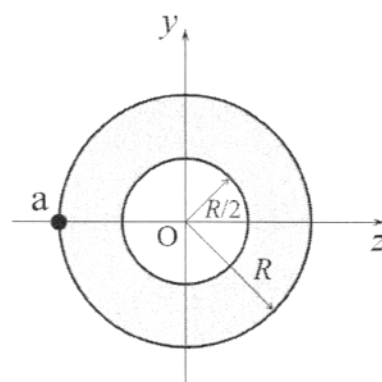


图 1-2

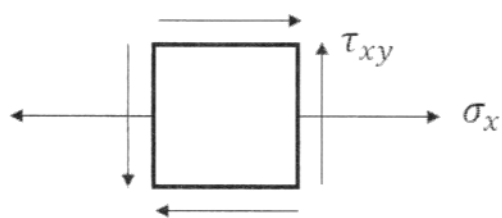


图 1-3

II. 平面トラス構造に関する以下の問いに答えよ．棒部材の断面は一様で断面積は S である．棒部材の材料も同一でヤング率は E である．自重の影響は無視することができ，座屈は発生しないものとする．

- (1) 図 1-4 に示すように長さ $\frac{L}{\cos \theta}$ の棒①と棒②を鉛直方向軸に対して左右対称に角度 θ をなして配置しトラス構造を作製した．点 O に鉛直下向きに荷重 P を加える．そのときの点 O の変位を求める下記の記述の (a) ～ (e) に入る適切な式あるいは語句を答えよ．

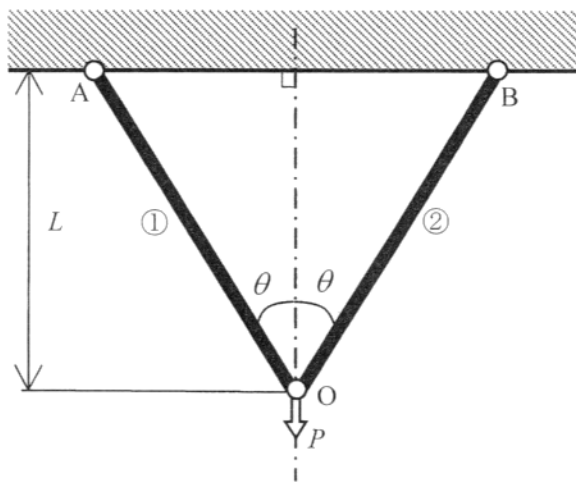


図 1-4

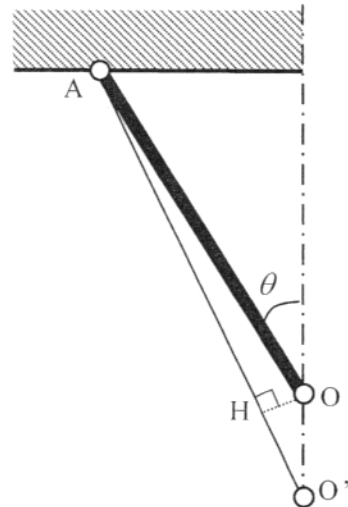


図 1-5

棒①の軸応力を σ_1 ，棒②の軸応力を σ_2 とする．構造は鉛直軸に対して対称なので $\sigma_1 = \sigma_2$ である．点 O における鉛直方向の力のつりあいより， $P =$ (a) となり， $\sigma_1 = \sigma_2 =$ (b) と求められる．この応力により発生する棒①の軸方向の伸びを δ_1 とすると， $\delta_1 =$ (c) となる．図 1-5 のように棒①および棒②の伸びにより点 O が点 O' に移動したとする． AO' に対して垂線 OH を立てると，長さ $O'H$ は近似的に伸び δ_1 に等しいとみなしてよく，また OO' と HO' のなす角度は近似的に θ とみなしてよいので，点 O の鉛直下向き変位は $\delta =$ (d) となる．このトラス構造のように，静力学的力のつり合いのみで応力と変位が決定できる構造は (e) 構造と呼ばれる．

- (2) 図 1-4 のトラス構造の対称軸上に長さ L の棒部材③を加えて図 1-6 に示すトラス構造を構成した．棒③の中央点 D に鉛直下向きに荷重 P を加えた．点 O の変位と，棒①に生じる軸応力および棒③に生じる軸応力を求めよ．

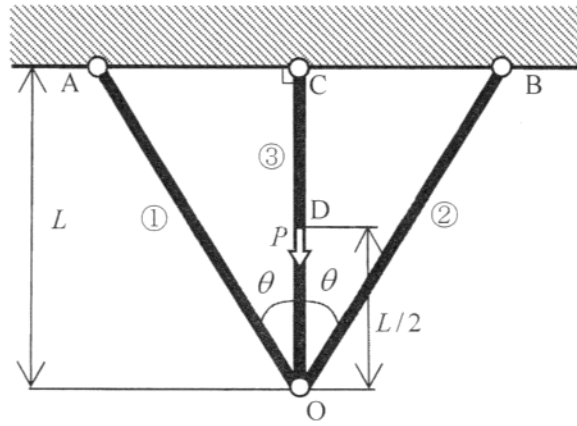


図 1-6

問題 2

下記の I, II の両方について解答せよ．なお，I の解答に答案用紙 1 枚を，II の解答に答案用紙 1 枚を，それぞれ用いること．

- I. 図 2-1 に示すように，正方形の板と 2 個のばねからなる系を考える．正方形の板の角が点 O でピン支持されており，平面内で点 O まわりに回転する．この板の一边の長さを l ，質量を m ，厚さおよび密度は一様とする．点 O まわりの板の慣性モーメントを J とする．点 G は板の重心である．また，2 個のばねが点 O から鉛直下方向に h の位置にある点 P で板に固定されている．ばねの他端はそれぞれ点 Q と点 R で壁に固定されている．ばねのばね定数はともに k とする．重力加速度は g である．図は系の静止状態を示している．点 O まわりに板の微小振動が生じる場合を考える．鉛直方向からの板の回転角を θ とする．ただし，回転角 θ と，ばねの変位は微小であるものとし， $\cos \theta \cong 1 - \frac{1}{2}\theta^2$ ， $\sin \theta \cong \theta$ と近似する．板の回転運動の摩擦，空気抵抗，ばねの質量は無視できるものとする．以下の設問に答えよ．

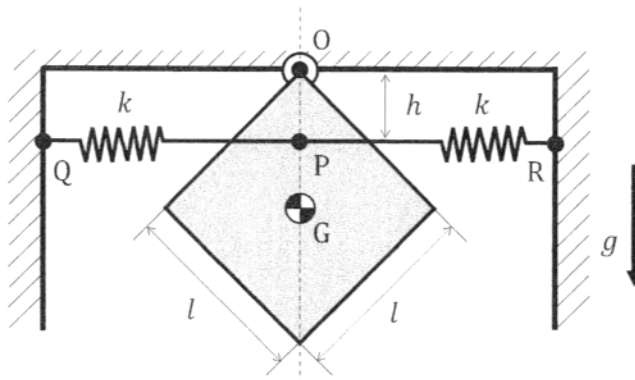


図 2-1

- (1) 点 O まわりの板の慣性モーメント J を求めよ．
- (2) この系の運動エネルギーと，ポテンシャルエネルギーを求めよ．
- (3) この系の運動方程式を求めよ．
- (4) この系の固有振動数 ω_0 を求めよ．

- (5) ばねの固定点P, Q, R が水平の位置にあり, h が大きくなるように固定点P, Q, R を鉛直下方向にスライドすると, 系の固有振動数はどう変わるか述べよ.
- (6) 点O まわりに, 周期的に変化するトルク $T(t) = X \sin \omega t$ を加える場合を考える. X および ω ($\omega \neq \omega_0$) は定数, t は時間である. ここでは, 振動振幅がとても小さい場合を考える. 板の定常応答における強制振動の振動振幅を求めよ.

- II. 図 2-2 に示すように、剛体 A の両端に設置されたプロペラによって回転姿勢制御を行う機械を考える．この剛体 A は重心 G まわりで平面内での回転運動のみを行う．プロペラの推進力によって剛体 A の両端で、中心軸 B に垂直な力 f が発生する．力 f は剛体 A の左右両端で図 2-2 に示すように作用する．各プロペラは重心 G から $\frac{L}{2}$ の位置に設置されている．剛体 A の姿勢角を θ で表現し、目標姿勢角度を θ_T で表現する．剛体 A の重心 G まわりの慣性モーメントを J とする．剛体 A は、回転抵抗として回転速度と逆向きのトルク $c\dot{\theta}$ を受ける． c は正の定数とする． t を時間とし、推進力、姿勢角、目標姿勢角の時間関数をそれぞれ $f(t)$, $\theta(t)$, $\theta_T(t)$ とし、それらをラプラス変換したものをそれぞれ $F(s)$, $\theta(s)$, $\theta_T(s)$ とする．以下の設問に答えよ．

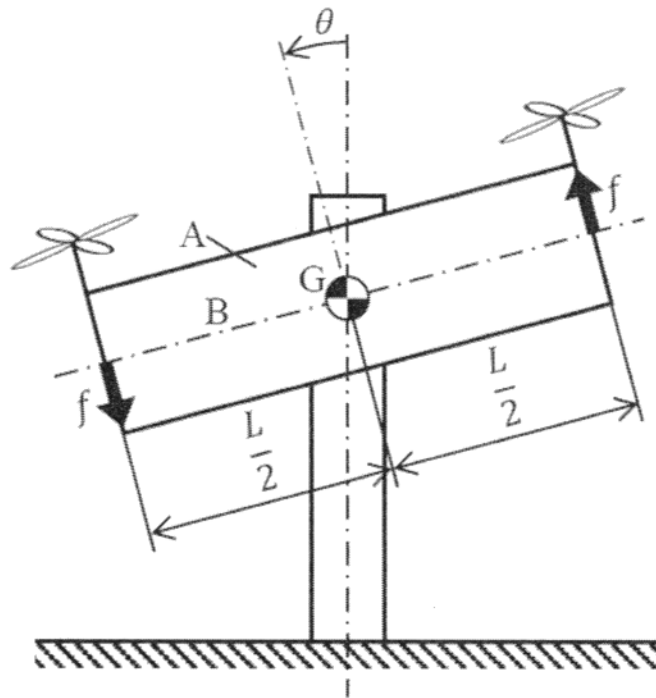


図 2-2

(1) $F(s)$ から $\theta(s)$ までの伝達関数を求めよ.

(2) 姿勢角 θ に対する PD 制御を行うために, 式(2-1)で表される $F(s)$ を考える. k_d と k_p は PD 制御のゲインとなる正の定数とする.

$$F(s) = \frac{-k_d s \theta(s) + k_p [\theta_T(s) - \theta(s)]}{1 + \tau s} + F_{err}(s) \quad (2-1)$$

このプロペラの出力は一次遅れ系としてモデル化され, その際の時定数を τ とする. また, 出力 $F(s)$ には誤差が含まれ, その誤差を $F_{err}(s)$ とする. 目標姿勢角と実際の姿勢角の誤差 $\theta_T(s) - \theta(s)$ を求めよ.

(3) 設問(2)の結果を基に, $\theta_T(t)$ と $f_{err}(t)$ が両方とも単位ステップ入力である場合を考える. なお, $F_{err}(s)$ を逆ラプラス変換したものを $f_{err}(t)$ とする. 十分な時間が経過した後の目標姿勢角と実際の姿勢角の誤差 $\theta_T(t) - \theta(t)$ を求めよ.

(4) 本設問では $c = 0$, $F_{err}(s) = 0$ とする. 姿勢角 θ に対する PD 制御を行うために, 式(2-2)で表される $F(s)$ を考える.

$$F(s) = \frac{-k_d s \theta(s) + k_p [\theta_T(s) - \theta(s)]}{1 + \tau s} \quad (2-2)$$

剛体 A の姿勢角制御を安定させるための k_d と k_p の条件を求めよ.

問題 3

下記のⅠ，Ⅱ両方について解答せよ．なお，Ⅰの解答に答案用紙1枚を，Ⅱの解答に答案用紙1枚を，それぞれ用いること．

Ⅰ. 図3-1は，部品①～⑦で構成され，ハンドルに下向きの力を加えてワークを加工しているときの，ボール盤の概略図である．以下の設問に答えよ．

- (1) 表3-1は，部品同士が直接相互作用している関係を示したものである．(a)～(f)にあてはまる，力の向きまたは運動の拘束の向きの関係を，(※1)および(※2)の例にならって，それぞれ記せ．

(※1)：「③は，①に，上向きの力を加える」

(※2)：「①は，④の上下方向以外の運動を拘束する」

- (2) 複数の部品の組み合わせ，(i)②③④および(ii)①④⑤は，部品群⑥⑦に，それぞれどのような作用をしているか，それぞれ30文字程度で記せ．

- (3) 図3-1のリンク機構を用いないボール盤の概略図を1つ示せ．

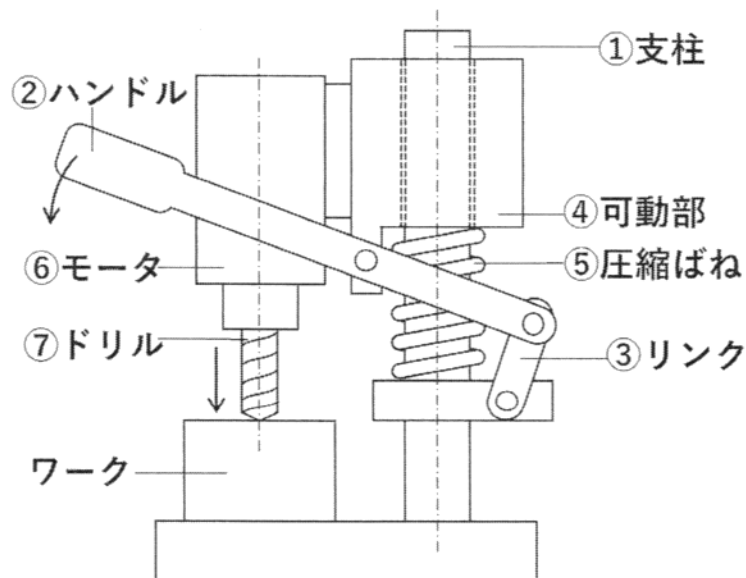


図 3-1

表 3-1

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
①			(※1)	(※2)	(a)		
②	—		(b)	(c)			
③	—	—					
④	—	—	—		(d)	(e)	
⑤	—	—	—	—			
⑥	—	—	—	—	—		(f)
⑦	—	—	—	—	—	—	

II. 3 軸マシニングセンタを設計したい．並進軸 (X, Y, Z) のストロークは，いずれも 500 mm である．高精度な工作機械を実現するための設計について，以下の設問に答えよ．

- (1) 工作機械は，「母性原理」を考慮して設計される．「母性原理」の意味を説明せよ．
- (2) 3 軸マシニングセンタの動剛性は，加工中の振動と密接に関係し，加工精度に大きな影響を及ぼす．(a)動剛性を評価する方法を答えよ．(b)動剛性を改善するための設計方針を，3 軸マシニングセンタの減衰特性，質量，静剛性の 3 つの観点からそれぞれ答えよ．
- (3) 3 軸マシニングセンタおよびその周辺には多くの熱源があり，機械構造の熱変形は加工精度に大きな影響を及ぼす．(a)加工精度に最も大きな影響を及ぼす熱源を 1 つ答えよ．(b)設問(3)の(a)で答えた熱源による熱変形問題に対する最も効果的な設計方針を 1 つ示せ．

(白紙)

FY2023 Department of Mechanical Engineering

Master Course Program Entrance Examination

“Mechanical Engineering” (Part 2)

2 0 2 2 / 8 / 3 0 (Tuesday) 1 3 : 0 0 ~ 1 6 : 0 0

Instructions

1. Do not open the exam booklet until you are instructed to begin.
2. Answer all Questions in Problems 1, 2, and 3.
3. If you find some incomplete printing or collating, report them to the proctor.
4. Make sure that you have all 6 answer sheets. Let the proctor know otherwise.
5. Use 2 answer sheets for each Problem. If there are Questions I and II in a Problem, use one answer sheet for one Question. If there are Questions I, II and III in a Problem, follow the instruction at the top of the Problem. If the space on the front side of the answer sheet is not enough, you may also use the backside. If the space is still not enough, ask the proctor for an additional answer sheet.
6. On each answer sheet, write your examinee number (candidate number) and the Problem number in the designated boxes. If you fail to do so, the answer sheet may not be graded. Write “Mechanical Engineering (Part 2)” in “Subject”. Leave “(/ of)” blank unless you use an additional answer sheet for the Problem.
7. Answer sheets with symbols or signs that are not related to the answers may be judged invalid.
8. Hand in all the answer sheets even if you have not used them.
9. You are provided with 3 worksheets. Write your examinee number (candidate number) on the upper left corner of each worksheet.
10. Hand in all 3 worksheets even if you have not used them.
11. You may take home the exam booklet.

(Blank)

Problem 1

Answer both of the following Questions I and II. Use one answer sheet for Question I and use another answer sheet for Question II.

I. As shown in Figure 1-1, a uniform cross-section beam BC of length $L/3$ is attached at a right angle to the end B of a uniform cross-section cantilever beam AB of length L . A concentrated load W is applied at the end C of the beam BC in the negative y -axis direction. A load P is applied to the cross-sectional area at the end B of the cantilever beam AB in the x -axis direction. The central axis of the beam BC before applying the concentrated load W is parallel to the z -axis and in the xz -plane. As shown in Figure 1-2, the cantilever beam AB has a circular cross-section of radius R and has a longitudinal hole of radius $R/2$. The length L of the cantilever beam AB is much larger than the radius R . Answer the following questions.

- (1) Find the I_y , I_z and I_p for the cross-sectional area of the cantilever beam AB. Here, I_y and I_z are the moment of inertia of area about the y - and z -axis, respectively. I_p is the polar moment of inertia of area about the centroid O.
- (2) Figure 1-3 shows the state of stress at the point a on the fixed end of the cantilever beam AB. Find the normal stress σ_x and the shear stress τ_{xy} at the point a.
- (3) Find the maximum principal stress and the maximum shear stress at point a on the fixed end of the cantilever beam AB.

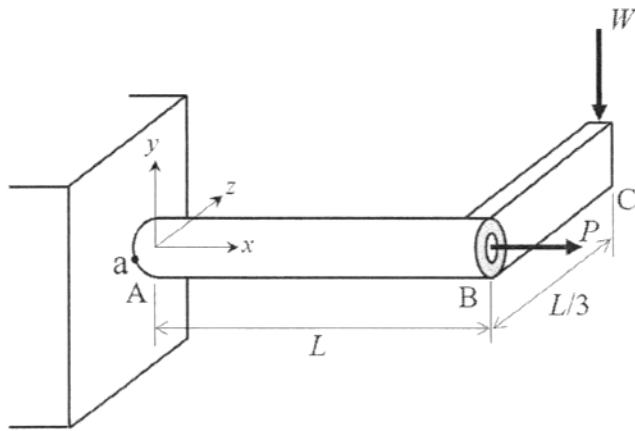


Figure 1-1

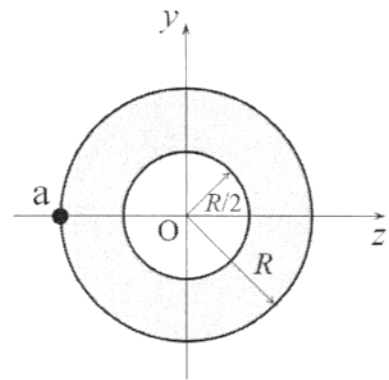


Figure 1-2

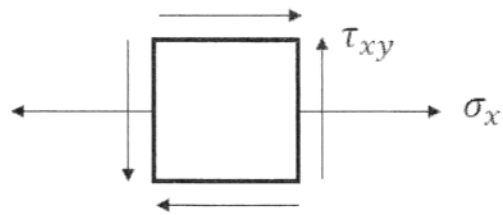


Figure 1-3

II. Answer the following questions concerning planar truss structures made of bar members. The cross-section of all the bar members is uniform, and their cross-sectional area is denoted by S . Their material properties are identical, and their Young's moduli are denoted by E . Assume that the gravitational effect can be neglected and buckling does not occur.

- (1) As shown in Figure 1-4, a truss structure is constructed by two bar members ① and ② of length $\frac{L}{\cos \theta}$ placed symmetrically to the vertical axis with angle θ . The load P is applied vertically downward at the point O. In the following text about the process of the calculation of the displacement of point O, fill the blanks (a) ~ (e) with appropriate mathematical formula or words.

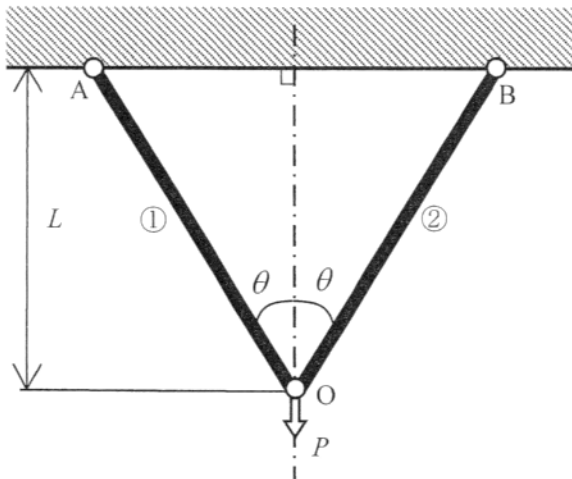


Figure 1-4

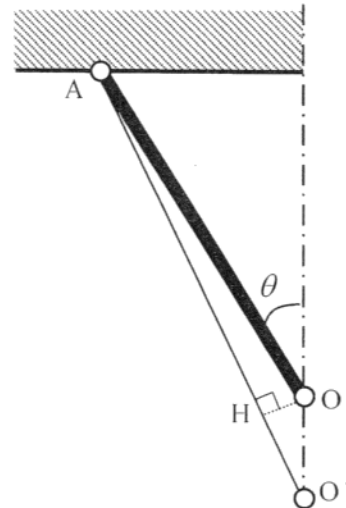


Figure 1-5

Let σ_1 be the axial stress of bar ①, and σ_2 the axial stress of bar ②. Due to the bar structure symmetry with respect to the vertical axis, $\sigma_1 = \sigma_2$. We can derive $P =$ (a) from the equilibrium condition in the vertical direction at the point O, so that, we can obtain $\sigma_1 = \sigma_2 =$ (b). Denoting the axial elongation of bar ① caused by the stress as δ_1 , $\delta_1 =$ (c) is derived. Assume that the point O shifts to O' due to the elongations of bars ① and ②, as shown in Figure 1-5. Let the perpendicular line to AO' be OH, then the length O'H is

approximately δ_1 , and the angle between OO' and HO' is approximately θ . The vertical downward displacement of the point O is obtained as $\delta = (d)$. This type of truss structure, in which the stress and displacement are determined only by the static equilibrium condition, is called (e) structure.

- (2) As shown in Figure 1-6, the bar member ③ of length L is added on the symmetry axis of the structure shown in Figure 1-4. The load P is applied vertically downward at the midpoint D of bar ③. Obtain the displacement of the point O , and the axial stresses of bars ① and ③.

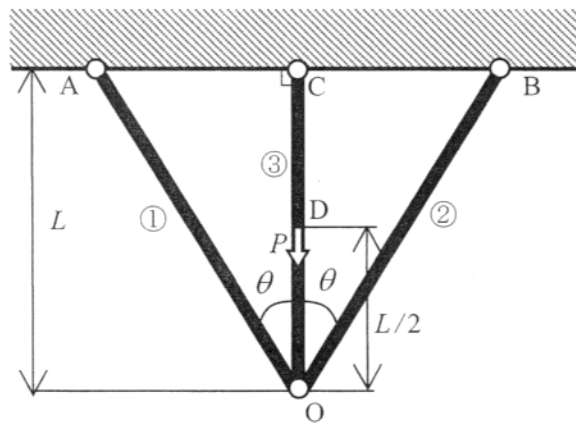


Figure 1-6

Problem 2

Answer both of the following Questions I and II. Use one answer sheet for Question I and use another answer sheet for Question II.

- I. Consider the system composed of a square plate and two springs, as shown in Figure 2-1. A corner of the square plate is subjected to point support at Point O and the plate rotates around Point O in the plane. The side length of the plate is l , the mass of the plate is m , and the thickness and the density of the plate are homogeneous. The moment of inertia of the plate around Point O is J . Point G is the center of gravity of the plate. The two springs are fixed on the plate at Point P, located at a distance h from Point O in the vertically downward direction. The other ends of each spring are fixed on the wall at Point Q and Point R, respectively. Both springs have a spring constant k . The gravitational acceleration is g . The system is shown at rest in the figure. Consider the case of small vibration of the plate around Point O. The rotation angle of the plate from the vertical direction is θ . Here, the rotation angle θ and the displacement of the springs are small. Assume $\cos \theta \cong 1 - \frac{1}{2}\theta^2$ and $\sin \theta \cong \theta$. The friction of the rotational motion of the plate, the air resistance, and the weight of the springs are negligible. Answer the following questions.

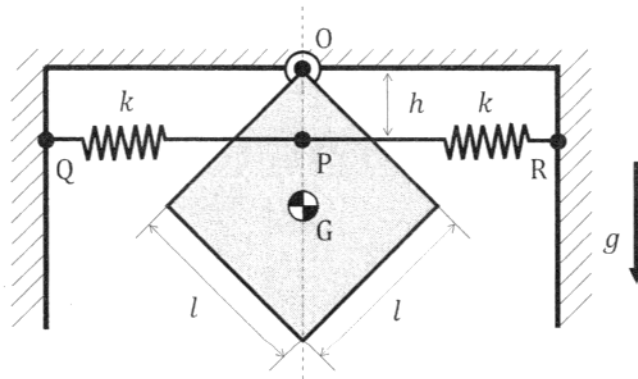


Figure 2-1

- (1) Obtain J which is the moment of inertia of the plate around Point O.
- (2) Derive the kinetic energy and the potential energy of the system.
- (3) Derive the motion equation of the system.
- (4) Obtain the natural frequency ω_0 of the system.
- (5) Explain how the natural frequency of the system varies when Points P, Q and R are translated in the vertically downward direction by increasing the distance h , that is, Points P, Q and R lie on the same horizontal line.
- (6) Consider the case when the periodically changing torque $T(t) = X \sin \omega t$ is applied around Point O, where X and ω ($\omega \neq \omega_0$) are constants and t is time. Here, consider the case when the vibration amplitude remains very small. Obtain the vibration amplitude of the plate for the steady state of the forced vibration.

II. As shown in Figure 2-2, consider the machine that controls its rotation angle by the propellers set on both ends of the rigid body A. The rigid body A rotates only around the center of gravity G in a plane. The propellers produce propulsive forces f perpendicularly to the center axis B at the both ends of the rigid body A. The propulsive forces f are applied at the left and right ends of the rigid body A, as shown in Figure 2-2. The propellers are set at a distance $\frac{L}{2}$ from the center of gravity G. The rotation angle of the rigid body A is defined as θ , and the target angle is defined as θ_T . The moment of inertia of the rigid body A around the center of gravity G is noted J . A torque $c\dot{\theta}$, the direction of which is opposite to the rotational velocity, is applied to the rigid body A as a rotational resistance, where c represents a positive constant. The variations in time t of the propulsive forces, rotation angle, and target angle are noted $f(t)$, $\theta(t)$ and $\theta_T(t)$, respectively, and their respective Laplace transforms are noted $F(s)$, $\theta(s)$ and $\theta_T(s)$. Answer the following questions.

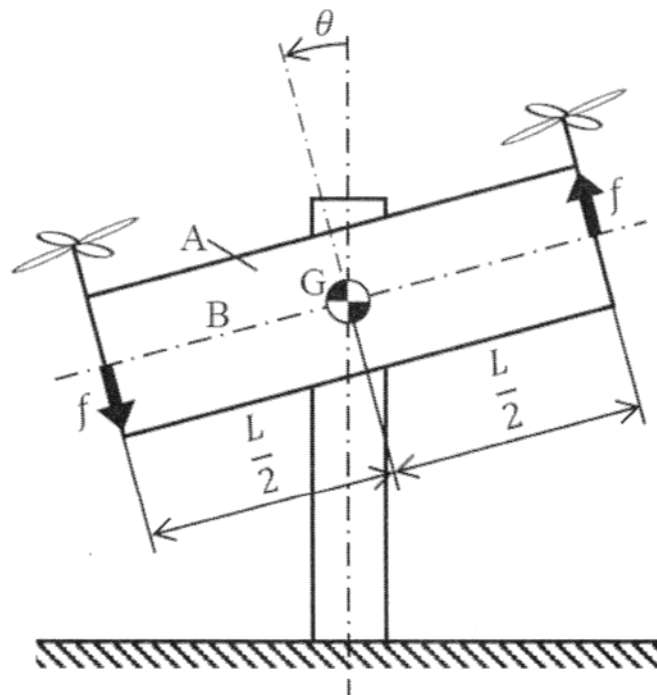


Figure 2-2

- (1) Derive the transfer function from $F(s)$ to $\theta(s)$.
- (2) Consider the case where $F(s)$ given in Equation (2-1) is used to conduct PD control of the rotation angle θ . The positive constants k_d and k_p represent gains for the PD control.

$$F(s) = \frac{-k_d s \theta(s) + k_p [\theta_T(s) - \theta(s)]}{1 + \tau s} + F_{err}(s) \quad (2-1)$$

The outputs of the propellers are modeled as first-order lag systems, and the time constant is defined as τ . The output $F(s)$ contains the error which is defined as $F_{err}(s)$. Derive the error between the target angle and the actual angle $\theta_T(s) - \theta(s)$.

- (3) Based on the result of Question (2), consider the case where both $\theta_T(t)$ and $f_{err}(t)$ are unit step inputs, where $f_{err}(t)$ is defined as the inverse Laplace transform of $F_{err}(s)$. Derive the error between the target angle and the actual angle $\theta_T(t) - \theta(t)$ after sufficient time has passed.
- (4) In this question, assume $c = 0$ and $F_{err}(s) = 0$. Consider the case where $F(s)$ given in Equation (2-2) is used to conduct PD control of the rotation angle θ .

$$F(s) = \frac{-k_d s \theta(s) + k_p [\theta_T(s) - \theta(s)]}{1 + \tau s} \quad (2-2)$$

Derive the condition on k_d and k_p to stabilize the control of the rotation angle of the rigid body A.

Problem 3

Answer both of the following Questions I and II. Use one answer sheet for Question I and use another sheet for Question II.

I. Figure 3-1 shows a schematic diagram of a drilling machine consisting of parts ①~⑦ while fabricating a workpiece with a downward force on the handle. Answer the following questions.

- (1) Table 3-1 shows the relationships between the parts that directly interact with each other. Describe the relationships corresponding to (a)~(f), respectively, including direction of force or direction of motion restraint, according to the examples (※1) and (※2).

(※1): “③ acts ① with an upward force”.

(※2): “① restrains motions of ④ other than up and down directions”.

- (2) Describe the functions that the multiple-part combinations (i)②③④ and (ii)①④⑤ have on the parts group ⑥⑦, in around 15 words for each.

- (3) Draw one schematic diagram of a drilling machine that does not use the link mechanism used in Figure 3-1.

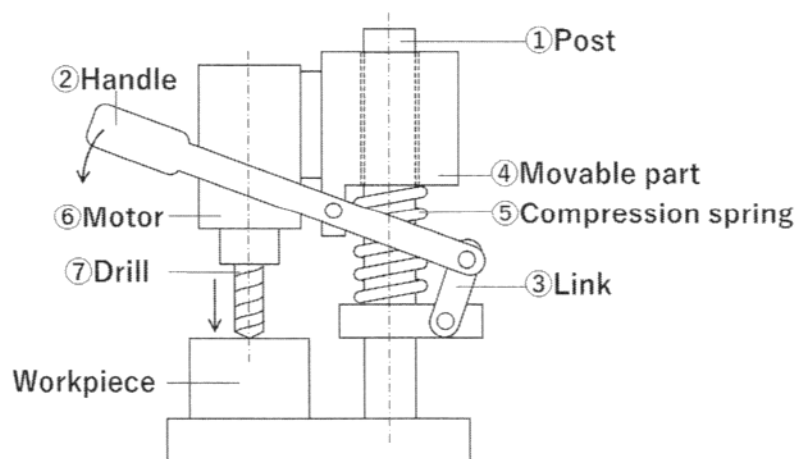


Figure 3-1

Table 3-1

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
①			(※1)	(※2)	(a)		
②	—		(b)	(c)			
③	—	—					
④	—	—	—		(d)	(e)	
⑤	—	—	—	—			
⑥	—	—	—	—	—		(f)
⑦	—	—	—	—	—	—	

II. Consider the design of a 3-axis machining center. The strokes of the translational axes (X, Y, and Z directions) are 500 mm, respectively. Answer the following questions regarding the design to realize a high precision machine tool.

- (1) A machine tool is designed considering the "copying principle". Explain the meaning of the "copying principle".
- (2) The dynamic rigidity of the 3-axis machining center is closely related to the vibration during machining and has a great influence on the machining accuracy. (a) Explain how to evaluate the dynamic rigidity. (b) Describe the design policies to improve the dynamic rigidity from the three viewpoints of damping property, mass and static rigidity of the 3-axis machining center, respectively.
- (3) There are many heat sources in and around the 3-axis machining center, and the thermal deformation of the machine structure has a significant influence on the machining accuracy. (a) Give the heat source that has the greatest impact on the machining accuracy. (b) Describe the most effective design policy to address the thermal deformation problem caused by the heat source of (a) of Question (3).

(Blank)