

MATEMATIČKI FAKULTET

Odgovori na teorijska ispitna pitanja iz geometrije

Radio

Lazar Jovanović 34/2023

Profesor

dr Srđan Vukmirović

Beograd, 2024/2025

Sadržaj

1	Konvencije	2
2	Pitanja	3
2.1	Vektori i osnovne operacije sa vektorima	3
2.2	Linearna zavisnost i nezavisnost vektora	4
2.3	Koordinate vektora i tačaka	4
2.4	Skalarni proizvod	5
2.5	Vektorski proizvod	5
2.6	Mešoviti proizvod	7
2.7	Težište, centar mase i baricentričke koordinate	8
2.8	Transformacije koordinata vektora i tačaka	9
2.9	Transformacije koordinata u ON bazama ravni	9
2.10	Afina preslikavanja	10
2.11	Izometrije ravni i prostora	12
2.12	Kvaternioni	14
2.13	Afina geometrija ravni	15
2.14	Ravan u prostoru	15
2.15	Prava u prostoru	16
2.16	Međusobni položaji pravih i ravni	16
2.17	Projekcije	17
2.18	Uglovi između pravih i ravni	18
2.19	Rastojanja	18
2.20	Prodor prave kroz trougao	19
2.21	Konusni preseci	20
2.22	Elipsa	20
2.23	Hiperbola	21
2.24	Parabola	22
2.25	Optičke osobine krivih drugog reda	23
2.26	Krive drugog reda	23
2.27	Bezijeove krive	24
2.28	Poligoni	25
2.29	Konveksni omotač	25
2.30	Triangulacija poligona	25
2.31	Poliedarske površi	26
2.32	Orijentacija poliedarske površi	26
2.33	Platonova tela	26

1 Konvencije

Sve konvencije važe dok se ne naglasi drugačije.

Primeri: U skripti neće biti navedeni primeri.

Množenje i skalarni proizvod: Množenje se neće označavati posebnom oznakom, dok će se za skalarni proizvod koristiti oznaka \cdot .

Uglovi: Uglovi između vektora će se označavati sa $\angle \vec{v} \vec{u}$, a uglovi formirani od tri tačke sa $\angle ABC$ gde će se posmatrati ugao kod tačke B . Podrazumeva se da se posmatra ugao u pozitivnom smeru od \vec{v} do \vec{u} , odnosno od AB do BC . Ugao je iz intervala $[0, 2\pi)$.

Mase tačaka: Za tačku A oznaka $A(m_A)$ znači da tačka A ima dodeljenu masu m_A . Podrazumevaće se i da se oznaka m_A odnosi na tačku A . Umesto A može da stoji proizvoljna oznaka tačke.

Baza vektorskog prostora: Vektori baze e su $\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n$, gde je n dimenzija vektorskog prostora.

Ortonormirana baza: U nastavku će se "ortonormirane baze" skraćeno nazivati "ON baze".

Ortonormirana baza pozitivne orijentacije: U nastavku će se "ortonormirane baze pozitivne orijentacije" skraćeno nazivati "ON+ baze".

Kvaternioni: Za kvaternion q važi $q = xi + yj + zk + w$.

2 Pitanja

2.1 Vektori i osnovne operacije sa vektorima

Sabiranje i množenje skalarom, nula vektor, suprotan vektor, kolinearni i komplanarni vektori, jedinični vektor, Dokaz T1.1 (tvrđenja S1-S4).

Definicija vektora: Klasa ekvivalencije usmerenih duži koje imaju isti pravac, smer i intenzitet.

Sabiranje vektora: Pri sabiranju se vektori nadovezuju, posmatraju se samo početna i krajnja tačka.

Množenje vektora skalarom: Vektor $\alpha \vec{v}$ ima isti pravac kao \vec{v} , ima intenzitet $|\alpha| |\vec{v}|$ i ima isti smer ako je $\alpha > 0$, a različit smer ako je $\alpha < 0$. Specijalno, ako je $\alpha = 0$, svaki vektor \vec{v} postaje nula vektor.

Nula vektor: Vektor $\vec{0}$ je nula vektor (zapisujemo kao $\vec{0}$ ili \overrightarrow{AA}) ako je njegov intenzitet jednak nuli. Nula vektor nema ni pravac ni smer.

Suprotni vektor: Suprotni vektor vektora \vec{v} (zapisujemo sa $-\vec{v}$) ima isti intenzitet i pravac kao vektor \vec{v} , a suprotan smer. Takođe, suprotan vektor vektora \overrightarrow{AB} možemo da zapišemo i kao \overrightarrow{BA} .

Kolinearni vektori: Vektori su kolinearni ako pripadaju istoj pravoj.

Komplanarni vektori: Vektori su komplanarni ako pripadaju istoj ravni.

Jedinični vektor: Jedinični vektor je vektor koji je intenziteta 1. Od svakog ne-nula vektora možemo da napravimo jedinični vektor normalizacijom.

Normalizacija vektora: Normalizacijom se od vektora \vec{v} dobija jedinični vektor $\frac{1}{|\vec{v}|} \vec{v}$. Ovaj vektor ima isti pravac i smer kao početni vektor, a intenzitet mu je 1.

T1.1: Neka su $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w} \in \mathbb{V}$. Tada važe sledeća tvrđenja:

$$(S1) \quad (\vec{u} + \vec{v}) + \vec{w} = \vec{u} + (\vec{v} + \vec{w})$$

$$\text{Dokaz: } (\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC}) + \overrightarrow{CD} = \overrightarrow{AC} + \overrightarrow{CD} = \overrightarrow{AD} = \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BD} = \overrightarrow{AB} + (\overrightarrow{BC} + \overrightarrow{CD})$$

$$(S2) \quad \vec{u} + \vec{0} = \vec{u} = \vec{0} + \vec{u}$$

$$\text{Dokaz: } \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BB} = \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{AA} + \overrightarrow{AB}$$

$$(S3) \quad \vec{u} + (-\vec{u}) = \vec{0}$$

$$\text{Dokaz: } \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BA} = \overrightarrow{AA}$$

$$(S4) \quad \vec{u} + \vec{v} = \vec{v} + \vec{u}$$

$$\text{Dokaz: } \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC} = \overrightarrow{AC} = -\overrightarrow{CA} = -\overrightarrow{CB} - \overrightarrow{BA} = \overrightarrow{BC} + \overrightarrow{AB}$$

2.2 Linearna zavisnost i nezavisnost vektora

Definicija, primeri, T1.3 (dokaz), T1.4.

Definicija linearne nezavisnosti: Vektori $\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_n$ su linearno nezavisni ako važi:

$$\alpha_1 \vec{v}_1 + \dots + \alpha_n \vec{v}_n = \vec{0} \iff \alpha_1 = \dots = \alpha_n = 0$$

T1.3: U ravni postoje dva linearno nezavisna vektora, a svaka tri su zavisna.

Dokaz: U ravni postoje 3 nekolinearne tačke O, A, B . Tada su vektori \vec{OA} i \vec{OB} linearno nezavisni.

Posmatrajmo \vec{u}, \vec{v} i \vec{w} koji pripadaju istoj ravni. Ako su \vec{u} i \vec{v} linearno zavisni tada važi $\vec{u} = \alpha \vec{v} \implies 1\vec{u} - \alpha\vec{v} + 0\vec{w} = \vec{0}$. Dakle i \vec{u}, \vec{v} i \vec{w} su linearno zavisni.

Pretpostavimo da su \vec{u} i \vec{v} linearno nezavisni. Posmatrajmo tačke u ravni O, A, B, C takve da $\vec{OA} = \vec{u}, \vec{OB} = \vec{v}, \vec{OC} = \vec{w}$. Obeležimo tačke X i Y na pravim OA i OB tako da je $OXC Y$ paralelogram. Važi $\vec{OX} = \alpha \vec{OA}$ i $\vec{OY} = \beta \vec{OB}$. Tada:

$$\vec{OX} + \vec{OY} = \vec{OC} = \alpha \vec{OA} + \beta \vec{OB} \implies \alpha \vec{OA} + \beta \vec{OB} - \vec{OC} = \vec{0}$$

što je kraj dokaza.

T1.4: U prostoru postoje tri linearno nezavisna vektora, a svaka četiri su linearno zavisni. Dokaz je potpuno analogan dokazu [T1.3](#).

2.3 Koordinate vektora i tačaka

Baza i dimenzija vektorskog prostora, koordinate vektora u bazi, primer, reper Oe , koordinate tačke u reperu, primer, koordinate vektora \vec{AB} preko koordinata tačaka A, B (dokaz).

Definicija baze: Baza je maksimalan skup linearno nezavisnih vektora.

Definicija dimenzije: Dimenzija je broj vektora u bazi.

Koordinate vektora u bazi: Ako je baza vektorskog prostora $e = (\vec{e}_1, \vec{e}_2)$, tada se svaki vektor može zapisati kao $\vec{v} = \alpha_1 \vec{e}_1 + \alpha_2 \vec{e}_2$ i kažemo da su njegove koordinate (α_1, α_2) . Njih zapisujemo sa $[\vec{v}]_e = [\alpha_1, \alpha_2]^T$.

Reper Oe : Ako fiksiramo bazu e i tačku O , Oe ćemo zvati reperom ili koordinatnim sistemom.

Koordinate tačke u reperu: Koordinate tačke X u reperu Oe su: $[X]_{Oe} := [\vec{OX}]_e$.

Koordinate vektora \vec{AB} preko koordinata tačaka A i B :

$$[\vec{AB}]_e = [\vec{AO} + \vec{OB}]_e = [\vec{AO}]_e + [\vec{OB}]_e = -[\vec{OA}]_e + [\vec{OB}]_e = [B]_{Oe} - [A]_{Oe}$$

2.4 Skalarni proizvod

Definicija, osobine, pojam ON baze, formula za skalarni proizvod u ON bazi (dokaz), računanje dužina i uglova skalarnim proizvodom, primeri.

Definicija skalarnog proizvoda: Skalarni proizvod vektora $\vec{u}, \vec{v} \in \mathbb{V}$ je definisan kao $\vec{u} \cdot \vec{v} = |\vec{u}| |\vec{v}| \cos(\angle \vec{u} \vec{v})$.

Osobine:

- (1) $\vec{u} \cdot \vec{v} = \vec{v} \cdot \vec{u}$ (simetričnost)
- (2) $\vec{u} \cdot (\alpha \vec{v} + \beta \vec{w}) = \alpha(\vec{u} \cdot \vec{v}) + \beta(\vec{u} \cdot \vec{w})$ (linearnost)
- (3) $\vec{u} \cdot \vec{u} = |\vec{u}|^2 \geq 0$ (pozitivnost)
- (4) $\vec{u} \cdot \vec{u} = 0 \iff \vec{u} = 0$ (nedegenerisanost)

Definicija ON baze: ON baza je svaka baza $e = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n)$ za koju važi da je svaki vektor jedinični i svaka dva su međusobno ortogonalna. Važi: $\vec{e}_i \cdot \vec{e}_j = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases}$.

Formula za skalarni proizvod u ON bazi: Neka za vektore $\vec{v}, \vec{u} \in \mathbb{V}$ važi $\vec{v} = x_1 \vec{e}_1 + x_2 \vec{e}_2$ i $\vec{u} = y_1 \vec{e}_1 + y_2 \vec{e}_2$. Tada je:

$$\begin{aligned} \vec{v} \cdot \vec{u} &= (x_1 \vec{e}_1 + x_2 \vec{e}_2) \cdot (y_1 \vec{e}_1 + y_2 \vec{e}_2) \\ &= x_1 y_1 (\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_1) + x_2 y_1 (\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2) + x_1 y_2 (\vec{e}_2 \cdot \vec{e}_1) + x_2 y_2 (\vec{e}_2 \cdot \vec{e}_2) \\ &= x_1 y_1 + x_2 y_2 \end{aligned}$$

Računanje dužine skalarnim proizvodom: $|\vec{v}| = \sqrt{|\vec{v}|^2} = \sqrt{\vec{v} \cdot \vec{v}}$.

Računanje ugla skalarnim proizvodom: $\angle \vec{u} \vec{v} = \arccos\left(\frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}| |\vec{v}|}\right)$

Skalarni proizvod $\vec{u} \cdot \vec{v}$ možemo da zapišemo i kao $u^T v$ gde su u i v redom kolone koordinata vektora \vec{u} i \vec{v} .

2.5 Vektorski proizvod

Orijentacija u ravni, orijentacija u prostoru, definicija vektorskog proizvoda, osobine, vektorski proizvod baznih vektora ON+ baze, formula za vektorski proizvod u ON+ bazi (dokaz), matrica vektorskog množenja (dokaz), računanje površine i orijentacije trougla vektorskim proizvodom (dokaz), kolinearnost tačaka, da li tačka pripada trouglu (dokaz), primeri.

Orijentacija u ravni: Pozitivna ako je obrnuta od smera kazaljke na satu, inače negativna.

Orijentacija u prostoru: Koristimo pravilo desne ruke.

Definicija vektorskog proizvoda: Pravac vektorskog proizvoda je normalan na ravan koju obrazuju vektori \vec{u} i \vec{v} . Intenzitet vektorskog proizvoda $|\vec{u} \times \vec{v}| = |\vec{u}||\vec{v}| \sin(\angle \vec{u} \vec{v})$. Smer je takav da je baza $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{u} \times \vec{v})$ pozitivno orijentisana.

Osobine:

$$(1) \quad \vec{u} \times \vec{v} = -\vec{v} \times \vec{u} \quad (\text{antisimetričnost})$$

$$(2) \quad (\alpha \cdot \vec{u} + \beta \cdot \vec{v}) \times \vec{w} = \alpha \cdot (\vec{u} \times \vec{w}) + \beta \cdot (\vec{v} \times \vec{w}) \quad (\text{linearnost})$$

Vektorski proizvod baznih vektora u ON+ bazi:

Vektorski proizvod baznih vektora u ON+ bazi vidimo iz tabele desno. Takođe, na osnovu tabele možemo da napravimo krug sa kog čitamo rezultate. Vektore \vec{e}_1, \vec{e}_2 i \vec{e}_3 postavimo u krug i strelicama povežemo \vec{e}_1 sa \vec{e}_2 , \vec{e}_2 sa \vec{e}_3 i \vec{e}_3 sa \vec{e}_1 . Tada, na primer, ako tražimo $\vec{e}_2 \times \vec{e}_1$ vidimo da strelica pokazuje sa \vec{e}_1 na \vec{e}_2 pa je znak negativan, a jedini neiskorišćen vektor je \vec{e}_3 pa je rešenje $-\vec{e}_3$.

\times	\vec{e}_1	\vec{e}_2	\vec{e}_3
\vec{e}_1	$\vec{0}$	$-\vec{e}_3$	\vec{e}_2
\vec{e}_2	\vec{e}_3	$\vec{0}$	$-\vec{e}_1$
\vec{e}_3	$-\vec{e}_2$	\vec{e}_1	$\vec{0}$

Formula za vektorski proizvod u ON+ bazi: Neka su $\vec{v}, \vec{u} \in \mathbb{V}$ i $\vec{v} = x_1 \vec{e}_1 + x_2 \vec{e}_2 + x_3 \vec{e}_3$, $\vec{u} = y_1 \vec{e}_1 + y_2 \vec{e}_2 + y_3 \vec{e}_3$. Tada:

$$\begin{aligned} \vec{v} \times \vec{u} &= (x_1 \vec{e}_1 + x_2 \vec{e}_2 + x_3 \vec{e}_3) \times (y_1 \vec{e}_1 + y_2 \vec{e}_2 + y_3 \vec{e}_3) \\ &= x_1 y_1 (\vec{e}_1 \times \vec{e}_1) + x_1 y_2 (\vec{e}_1 \times \vec{e}_2) + x_1 y_3 (\vec{e}_1 \times \vec{e}_3) \\ &\quad + x_2 y_1 (\vec{e}_2 \times \vec{e}_1) + x_2 y_2 (\vec{e}_2 \times \vec{e}_2) + x_2 y_3 (\vec{e}_2 \times \vec{e}_3) \\ &\quad + x_3 y_1 (\vec{e}_3 \times \vec{e}_1) + x_3 y_2 (\vec{e}_3 \times \vec{e}_2) + x_3 y_3 (\vec{e}_3 \times \vec{e}_3) \\ &= x_1 y_1 \vec{0} + x_1 y_2 \vec{e}_3 - x_1 y_3 \vec{e}_2 \\ &\quad - x_2 y_1 \vec{e}_3 + x_2 y_2 \vec{0} + x_2 y_3 \vec{e}_1 \\ &\quad + x_3 y_1 \vec{e}_2 - x_3 y_2 \vec{e}_1 + x_3 y_3 \vec{0} \\ &= \begin{vmatrix} \vec{e}_1 & \vec{e}_2 & \vec{e}_3 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

Matrica vektorskog množenja: \vec{v}_\times je matrica vektorskog množenja za fiksirani vektor \vec{v} . Kada se ona pomnoži nekim vektorom \vec{u} dobija se $\vec{v} \times \vec{u}$. Izvodi se izračunavanjem $\vec{v} \times \vec{e}_1$ (prva kolona), $\vec{v} \times \vec{e}_2$ (druga kolona), $\vec{v} \times \vec{e}_3$ (treća kolona). Neka je $\vec{v} = x_1 \vec{e}_1 + x_2 \vec{e}_2 + x_3 \vec{e}_3$.

$$\text{Tada } \vec{v}_\times = \begin{bmatrix} 0 & x_3 & -x_2 \\ -x_3 & 0 & x_1 \\ x_2 & -x_1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Površina trougla ABC:

$$P_{ABC} = \frac{1}{2} a h_a = \frac{1}{2} |\vec{BC}| |\vec{BA}| \sin(\angle \vec{BA} \vec{BC}) = \frac{1}{2} |\vec{BC} \times \vec{BA}|$$

Orijentacija trougla ABC: Trougao ABC u reperu Oe je zadat sa $[A]_{Oe} = (x_1, x_2)^T$, $[B]_{Oe} = (y_1, y_2)^T$ i $[C]_{Oe} = (z_1, z_2)^T$. Njegove koordinate možemo da proširimo sa $[A]_{Oe} =$

$(x_1, x_2, 0)^T$, $[B]_{Oe} = (y_1, y_2, 0)^T$ i $[C]_{Oe} = (z_1, z_2, 0)^T$. Kažemo da je trougao ABC pozitivno orijentisan ako je $\vec{AB} \times \vec{AC}$ istog pravca i smera kao \vec{e}_3 .

Kolinearnost tačaka: Tri tačke su kolinearne ako je "površina trougla" koji obrazuju 0. Dakle $\frac{1}{2} \cdot |\vec{BC} \times \vec{AC}| = 0$.

Da li tačka pripada trouglu: Tačka P pripada trouglu ABC ako su trouglovi ABP , BCP i CAP iste orijentacije.

2.6 Mešoviti proizvod

Definicija, osobine, formula za mešoviti proizvod u ON+ bazi (dokaz), zapremina paralelopipeda - T1.7 (dokaz), zapremina tetraedra, orijentacija baze prostora, nezavisnost tri vektora prostora, primeri.

Definicija mešovitog proizvoda: $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = (\vec{u} \times \vec{v}) \cdot \vec{w}$.

Osobine:

- (1) $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = -[\vec{v}, \vec{u}, \vec{w}]$ (antisimetričnost)
- (2) $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = [\vec{v}, \vec{w}, \vec{u}]$ (cikličnost)
- (3) $[\alpha \cdot \vec{u} + \beta \cdot \vec{v}, \vec{w}, \vec{z}] = \alpha \cdot [\vec{u}, \vec{w}, \vec{z}] + \beta \cdot [\vec{v}, \vec{w}, \vec{z}]$ (linearnost)

Formula za mešoviti proizvod u ON+ bazi:

$$[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = (\vec{u} \times \vec{v}) \cdot \vec{w} = \begin{vmatrix} \vec{e}_1 & \vec{e}_2 & \vec{e}_3 \\ x_{\vec{u}} & y_{\vec{u}} & z_{\vec{u}} \\ x_{\vec{v}} & y_{\vec{v}} & z_{\vec{v}} \end{vmatrix} \cdot \vec{w} = \text{*sredi se*} = \begin{vmatrix} x_{\vec{u}} & y_{\vec{u}} & z_{\vec{u}} \\ x_{\vec{v}} & y_{\vec{v}} & z_{\vec{v}} \\ x_{\vec{w}} & y_{\vec{w}} & z_{\vec{w}} \end{vmatrix}$$

T1.7: Zapremina paralelopipeda jednaka je mešovitom proizvodu tri vektora.

Dokaz: Neka je dat paralelopiped $ABCD A_1 B_1 C_1 D_1$ i neka su $\vec{AB} = \vec{u}$, $\vec{AD} = \vec{v}$ i $\vec{AA}_1 = \vec{w}$. Tada je zapremina $V = P_{ABCD} \cdot h = |\vec{u} \times \vec{v}| \cdot h = ||\vec{u} \times \vec{v}| \cdot \vec{w}| \cos(\angle((\vec{u} \times \vec{v}) \vec{w})) = |(\vec{u} \times \vec{v}) \cdot \vec{w}| = |[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}]|$.

Zapremina tetraedra: $\frac{1}{6} |[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}]|$.

Dokaz: Tražimo zapreminu tetraedra $ABDA_1$. Dopunimo tetraedar do paralelopipeda $ABCD A_1 B_1 C_1 D_1$. On je izgrađen od dve trostrane prizme $ABDA_1 B_1 D_1$ i $BCDB_1 C_1 D_1$ koje su jednakih jednakih zapremina. Posmatrajmo trostranu prizmu $ABDA_1 B_1 D_1$. Iz nje možemo da izdvojimo tetraedre $ABDA_1$, $BDA_1 B_1$ i $DA_1 B_1 D_1$. Tetraedri $ABDA_1$ i $BDA_1 B_1$ imaju iste površine baza ABA_1 i $BA_1 B_1$ i iste visine iz tačke D pa su im i zapremine iste. Tetraedri $ABDA_1$ i $DA_1 B_1 D_1$ imaju iste površine baza $AA_1 D$ i $DA_1 D_1$ i iste visine iz tačke B pa su im i zapremine iste. Dakle, trostrana prizma $ADCA_1 B_1 D_1$ se sastoji od tri tetraedra jednakih zapremina. Zapremina tetraedra $ABDA_1$ je jedna šestina zapremine što se i tražilo paralelopipeda.

Orijentacija baze prostora: Ako je $[\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3] > 0$ onda je orijentacija pozitivna.

Nezavisnost tri vektora prostora: Tri vektora su nezavisna ako je zapremina paralelopipeda koji obrazuju veća od nule.

2.7 Težište, centar mase i baricentričke koordinate

Zakon poluge, rešavanje zakona poluge centrom mase dve tačke, centar mase tri tačke, "rešavanje trougla" centrom mase tri tačke, centar mase n tačaka, težište n tačaka, dokaz da definicija težišta trougla ne zavisi od tačke O - vežbe, primeri, baricentričke koordinate.

Zakon poluge: Iz jednakosti momenta sila se izvodi zakon poluge $|AT| : |TB| = m_B : m_A$ ili vektorski $m_A \overrightarrow{TA} + m_B \overrightarrow{TB} = \vec{0}$.

Centar mase tačaka $A(m_A)$ i $B(m_B)$: $\overrightarrow{OT} = \frac{1}{m_A + m_B} (m_A \overrightarrow{OA} + m_B \overrightarrow{OB})$.

Centar mase tri tačke: $\overrightarrow{OT} = \frac{1}{m_A + m_B + m_C} (m_A \overrightarrow{OA} + m_B \overrightarrow{OB} + m_C \overrightarrow{OC})$.

Centar mase n tačaka: $\frac{1}{m_{A_1} + \dots + m_{A_n}} (m_{A_1} \overrightarrow{OA_1} + \dots + m_{A_n} \overrightarrow{OA_n}) = \overrightarrow{OT}$.

Težište n tačaka: Težište n tačaka se dobija kada su sve mase jednake. Neka važi $m_{A_1} = \dots = m_{A_n} = m$. Tada je:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OT} &= \frac{1}{m_{A_1} + \dots + m_{A_n}} (m_{A_1} \overrightarrow{OA_1} + \dots + m_{A_n} \overrightarrow{OA_n}) \\ &= \frac{1}{nm} (m \overrightarrow{OA_1} + \dots + m \overrightarrow{OA_n}) \\ &= \frac{1}{n} (\overrightarrow{OA_1} + \dots + \overrightarrow{OA_n}) \end{aligned}$$

Dokaz da definicija težišta trougla ne zavisi od tačke O : Neka su date tačke A , B , C i njihove mase i neka važi $m_A + m_B + m_C = M$. Tada:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OT} &= \frac{1}{M} (m_A \overrightarrow{OA} + m_B \overrightarrow{OB} + m_C \overrightarrow{OC}) \\ \overrightarrow{OS} + \overrightarrow{ST} &= \frac{1}{M} (m_A (\overrightarrow{OS} + \overrightarrow{SA}) + m_B (\overrightarrow{OS} + \overrightarrow{SB}) + m_C (\overrightarrow{OS} + \overrightarrow{SC})) \\ \overrightarrow{OS} + \overrightarrow{ST} &= \frac{1}{M} (m_A \overrightarrow{SA} + m_B \overrightarrow{SB} + m_C \overrightarrow{SC}) + \overrightarrow{OS} \\ \overrightarrow{ST} &= \frac{1}{M} (m_A \overrightarrow{SA} + m_B \overrightarrow{SB} + m_C \overrightarrow{SC}) \end{aligned}$$

Baricentričke koordinate: Baricentričke koordinate tačke M su mase koje je potrebno dodeliti tačkama A_1, \dots, A_n tako da tačka M postane njihov centar mase. Baricentričke koordinate se dele na homogene i nehomogene. U slučaju n tačaka $A_1(m_{A_1}), \dots, A_n(m_{A_n})$, homogene baricentričke koordinate će biti $(m_{A_1} : \dots : m_{A_n})$. Homogene baricentričke koordinate su određene do na proporcionalnost. Za normalizovane ili nehomogene baricentričke koordinate važi da je $m_{A_1} + \dots + m_{A_n} = 1$. Za proizvoljne mase m_{A_1}, \dots, m_{A_n} nehomogene baricentričke koordinate dobijamo sa: $(\frac{m(A_1)}{m(A_1) + \dots + m(A_n)}, \dots, \frac{m(A_n)}{m(A_1) + \dots + m(A_n)})$.

2.8 Transformacije koordinata vektora i tačaka

Matrica prelaska, veza koordinata vektora u različitim bazama, primer, transformacija koordinata tačaka - formule (1.23, 1.24) izvođenje, primer.

Matrica prelaska: Matrica u kojoj se u i -toj koloni nalaze koordinate i -tog vektora nove baze u staroj bazi.

Transformacije koordinata tačaka: Pretpostavimo da iz repera Oe prelazimo u reper Qf . Dodatno, neka je C matrica prelaska iz baze e u bazu f . Tada:

$$[X]_{Qf} = [\overrightarrow{QX}]_f = [\overrightarrow{QO}]_f + [\overrightarrow{OX}]_e = [O]_{Qf} + C[\overrightarrow{OX}]_e = [O]_{Qf} + C[X]_{Oe} \quad (1.23)$$

Ako je $[X]_{Oe} = x'$, $[X]_{Qf} = x$ i $[O]_{Qf} = q$, tada dobijamo $x = q + Cx'$ (1.24).

2.9 Transformacije koordinata u ON bazama ravni

Slučaj baza iste orijentacije, matrica rotacije, osobine matrice rotacije, slučaj baza različite orijentacije, matrica refleksije, osobine matrica refleksije, grupe $SO(2)$ i $O(2)$.

Slučaj baza iste orijentacije: Neka su dati ON reperi ravni Oe i Qf koji su iste orijentacije. Želimo da predemo iz Oe u Qf . Označimo sa ϕ ugao $\angle \vec{e}_1 \vec{f}_1$. Tada važe jednakosti $\vec{f}_1 = \cos(\phi)\vec{e}_1 + \sin(\phi)\vec{e}_2$ i $\vec{f}_2 = -\sin(\phi)\vec{e}_1 + \cos(\phi)\vec{e}_2$. Dakle $[\vec{f}_1]_e = (\cos(\phi), \sin(\phi))^T$ i $[\vec{f}_2]_e = (-\sin(\phi), \cos(\phi))^T$. Odavde dobijamo formulu za ON repere iste orijentacije: $x = q + \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} x'$.

Matrica rotacije: $R_\phi = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$ je matrica rotacije vektora za ugao ϕ . Rotira se u pozitivnom smeru.

Osobine matrica rotacije:

- (1) $(R_\phi)^{-1} = R_{-\phi} = (R_\phi)^T$
- (2) $\det(R_\phi) = 1$
- (3) $R_\phi \cdot R_\psi = R_{\phi+\psi} = R_\psi \cdot R_\phi$

Slučaj baza različite orijentacije: Neka su dati ON reperi ravni Oe i Qf koji su različite orijentacije. Želimo da predemo iz Oe u Qf . Označimo sa ϕ ugao $\angle \vec{e}_1 \vec{f}_1$. Tada važe jednakosti $\vec{f}_1 = \cos(\phi)\vec{e}_1 + \sin(\phi)\vec{e}_2$ i $\vec{f}_2 = \sin(\phi)\vec{e}_1 - \cos(\phi)\vec{e}_2$. Dakle $[\vec{f}_1]_e = (\cos(\phi), \sin(\phi))^T$ i $[\vec{f}_2]_e = (\sin(\phi), -\cos(\phi))^T$. Odavde dobijamo formulu za ON repere različite orijentacije: $x = q + \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ \sin(\phi) & -\cos(\phi) \end{bmatrix} x'$.

Matrica refleksije: $S_\phi = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ \sin(\phi) & -\cos(\phi) \end{bmatrix}$ je matrica refleksije u odnosu na vektor \vec{p} . Prvi vektor baze koja se transformiše gradi sa vektorom \vec{p} ugao $\frac{\phi}{2}$.

Osobine matrica refleksije:

$$(1) (S_\phi)^{-1} = (S_\phi)^T$$

$$(2) (S_\phi)^2 = E$$

$$(3) \det(S_\phi) = -1$$

$$(4) S_\phi S_\psi = R_{\phi-\psi}$$

Grupa $SO(2)$: $SO(2) = \{R_\phi \mid \phi \in \mathbb{R}\}$ je specijalna ortogonalna grupa reda 2. Broj 2 označava da se posmatra ravan.

Grupa $O(2)$: $O(2) = SO(2) \cup \{S_\phi \mid \phi \in \mathbb{R}\} = \{A \in Gl_2(\mathbb{R}) \mid A^{-1} = A^T\}$ je ortogonalna grupa reda 2. Broj 2 označava da se posmatra ravan.

2.10 Afina preslikavanja

Definicija, pasivna i aktivna tačka gledišta, osobine afinih preslikavanja (T5.2) (dokaz), određenost afinog preslikavanja sa tri para odgovarajućih tačaka, predstavljanje afinih preslikavanja ravni 3×3 matricama, translacija, rotacija (oko O i oko proizvoljne tačke), refleksija u odnosu na pravu, skaliranje, smicanje, primeri.

Definicija afinih preslikavanja: Neka je $\bar{f} : \mathbb{V} \rightarrow \mathbb{V}$ linearno preslikavanje vektorskog prostora koji je pridružen prostoru tačaka \mathbb{E} . Afino preslikavanje $f : \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{E}$ je preslikavanje tačaka koje je indukovano sa \bar{f} u smislu da važi sledeća ekvivalencija za svake dve tačke M i N :

$$f(M) = M' \wedge f(N) = N' \iff \bar{f}(\overrightarrow{MN}) = \overrightarrow{M'N'}$$

Pasivna tačka gledišta: Posmatramo istu tačku iz više repera. Tada se njene različite koordinate odnose na koordinate u različitim reperima.

Aktivna tačka gledišta: Posmatramo istu tačku u istom reperu pre i posle nekog afinog preslikavanja. Tada se njene različite koordinate odnose na koordinate pre i posle preslikavanja.

Teorema: Svako afino preslikavanje $f : \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{E}$ indukovano linearnim preslikavanjem $\bar{f} : \mathbb{V} \rightarrow \mathbb{V}$ u fiksiranom reperu O_e , ima oblik: $[f(M)]_{O_e} = [\bar{f}]_e[M]_{O_e} + [f(O)]_{O_e}$.

Dokaz:

$$\begin{aligned} [f(M)]_{O_e} - [f(O)]_{O_e} &= [\overrightarrow{Of(M)}]_e - [\overrightarrow{Of(O)}]_e = [\overrightarrow{Of(M)}]_e + [\overrightarrow{f(O)O}]_e \\ &= [\overrightarrow{f(O)f(M)}]_e = [\overrightarrow{f(OM)}]_e = [\bar{f}]_e[\overrightarrow{OM}]_e \\ &= [\bar{f}]_e[M]_{O_e} \\ [f(M)]_{O_e} &= [\bar{f}]_e[M]_{O_e} + [f(O)]_{O_e} \end{aligned}$$

Napomena: Kolone matrice $[\bar{f}]_e$ su zapravo slike baznih vektora baze e (i -ta kolona će biti $\bar{f}(\vec{e}_i)$).

Osobine afinih preslikavanja ravni (T5.2):

- (1) Preslikaju prave u prave.

Dokaz: S obzirom da je svako afino preslikavanje indukovano linearnim preslikavanjem vektorskog prostora, a linearno preslikavanje vektorskog prostora čuva kolinearnost, tada i afino preslikavanje čuva kolinearnost, odnosno slika prave u prave.

- (2) Čuvaju razmeru kolinearnih duži.

Dokaz: Analogno prošloj osobini.

- (3) Čuvaju paralelnost pravih.

Dokaz: Ako se posmatraju po dve tačke na dve paralelne prave, dobijamo 2 kolinearna vektora. Odavde se analogno završava dokaz.

- (4) Odnos površina slike i originala jednak je $|det(a_{ij})|$.

Dokaz: Napomenimo da je a_{ij} zapravo matrica $[\bar{f}]_e$. Zbog jednostavnijeg zapisa i jer je reper fiksiran ćemo izostaviti reper iz zapisa. Neka je $f(O) = O'$, $f(A) = A'$ i $f(B) = B'$. Površina trougla OAB je $\frac{1}{2} \cdot |det(\vec{OA}, \vec{OB})|$, a površina trougla $O'A'B'$ je $\frac{1}{2} \cdot |det(\vec{O'A'}, \vec{O'B'})|$. Takođe su $\vec{O'A'} = a_{ij} \cdot \vec{OA}$ i $\vec{O'B'} = a_{ij} \cdot \vec{OB}$. Za kraj, koristimo svojstvo $det(A \cdot B) = det(A) \cdot det(B)$.

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{det(\vec{OA}, \vec{OB})}{det(\vec{OA}, \vec{OB})} \\ det(a_{ij}) &= \frac{det(a_{ij} \cdot \vec{OA}, a_{ij} \cdot \vec{OB})}{det(\vec{OA}, \vec{OB})} \\ det(a_{ij}) &= \frac{det(\vec{O'A'}, \vec{O'B'})}{det(\vec{OA}, \vec{OB})} \end{aligned}$$

- (5) Čuvaju centar mase i baricentričke koordinate.

Dokaz: Sledi direktno iz čuvanja razmere.

- (6) Preslikavanja za koje važi $det(a_{ij}) > 0$ čuvaju orijentaciju, inače menjaju.

Dokaz: Po algebarskoj definiciji, dve baze su iste orijentacije ako je determinanta matrice prelaska iz jedne u drugu veća od nule. Ovo je aktivna varijanta ove definicije.

Određenost afinog preslikavanja sa tri para odgovarajućih tačaka: Ako su date tri nekolinearne tačke i njihove slike može se odrediti jedinstveno afino preslikavanje ravni.

Translacija: $\mathcal{T}_{\vec{t}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_t \\ 0 & 1 & y_t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, gde je $\vec{t} = (x_t, y_t)$ vektor za koji se translira.

Rotacija oko O : $\mathcal{R}_\phi = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, gde je ϕ ugao za koji se rotira.

Rotacija oko proizvoljne tačke: $\mathcal{T}_{\overrightarrow{OM}} \circ \mathcal{R}_\phi \circ \mathcal{T}_{\overrightarrow{MO}}$, gde je M tačka oko koje rotiramo, a ϕ ugao za koji rotiramo.

Refleksija u odnosu na pravu koja prolazi kroz O : $\mathcal{S}_{p_0} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & -\cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$,

gde je $\frac{\phi}{2}$ ugao između x ose i p_0 . Refleksija u odnosu na pravu koja prolazi kroz proizvoljnu tačku se dobija analogno kao rotacija.

Skaliranje sa centrom u tački O : $\mathcal{H}_{\lambda_1, \lambda_2} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, gde je λ_1 koeficijent skaliranja u pravcu prvog baznog vektora, a λ_2 koeficijent skaliranja u pravcu drugog baznog vektora. Skaliranje sa centrom u proizvoljnoj tački analogno rotaciji.

Smicanje: Smicanje preslikava kvadrat u pravougaonik iste površine. Matrice smicanja:

$\mathcal{S}_x(\lambda) = \begin{bmatrix} x & \lambda & 0 \\ 0 & y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, gde je λ koeficijent smicanja u pravcu x ose.

$\mathcal{S}_y(\lambda) = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 \\ \lambda & y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, gde je λ koeficijent smicanja u pravcu y ose.

2.11 Izometrije ravni i prostora

Definicija, direktne i indirekne izometrije, ortogonalne matrice i njihova determinanta, opis afinih transformacija ravni (pitanje 9), rotacija oko prave u prostoru, rotacije oko koordinatnih osa, Rodrigezova formula, refleksija u odnosu na ravan (računanje), Prva Ojlerova teorema, Ojlerovi uglovi, Druga Ojlerova teorema, veza sopstvenih i svetskih rotacija - smisao, slučaj zaključanog žiroskopa.

Definicija izometrije: Preslikavanje koje čuva dužine u prostoru \mathbb{E} proizvoljne dimenzije.

Direktne izometrije: Čuvaju orijentaciju (kretanja).

Indirekne izometrije: Menjaju orijentaciju.

Ortogonalna matrica i njena determinanta: Matrica A za koju važi $AA^T = E$. Za determinantu ortogonalne matrice važi $1 = \det(E) = \det(AA^T) = \det(A)\det(A^T) = \det(A)\det(A) = \det(A)^2$.

Opis afinih transformacija ravni: [Pitanje 9](#).

Matrica rotacije oko x ose: $\mathcal{R}_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$

Matrica rotacije oko y ose: $\mathcal{R}_y(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix}$

Matrica rotacije oko z ose: $\mathcal{R}_z(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin \phi & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Rotacija oko proizvoljne prave koja sadrži O (Rodríguezova formula): Neka je dat ON reper Oe i neka su date tačka M i prava p_0 koja sadrži tačku O i ugao ϕ za koji rotiramo tačku M oko prave p_0 . Neka je jedinični vektor pravca prave p_0 vektor \vec{p} . Posmatrajmo ravan α koja sadrži tačku M i njen normalni vektor je vektor \vec{p} . Neka je $\alpha \cap p_0 = \{O'\}$ i neka su $\vec{x} = \overrightarrow{OM}$, $\vec{x}_1 = \overrightarrow{OO'}$ i $\vec{x}_2 = \overrightarrow{O'M}$. Tada:

$$\begin{aligned} \vec{x} &= \vec{x}_1 + \vec{x}_2 = \lambda \vec{p} + \vec{x}_2 \\ \vec{p} \cdot \vec{x} &= \lambda(\vec{p} \cdot \vec{p}) + \vec{p} \cdot \vec{x}_2 = \lambda|\vec{p}|^2 = \lambda \end{aligned}$$

Označimo sa p, x, x_1, x_2 kolone koordinata vektora $\vec{p}, \vec{x}, \vec{x}_1, \vec{x}_2$. Tada za x_1 dobijamo $x_1 = p\lambda = p(p^T x) = (pp^T)x$, a za x_2 dobijamo $x_2 = x - x_1 = Ex - (pp^T)x = (E - pp^T)x$. Neka je sada M' tačka koja se dobija rotacijom tačke M oko prave p za ugao ϕ . Možemo da posmatramo ortogonalnu bazu $(\vec{p}, \vec{x}_2, \vec{p} \times \vec{x}_2)$. Tada je:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{O'M'} &= \cos(\phi)\vec{x}_2 + \sin(\phi)(\vec{p} \times \vec{x}_2) \\ &= \cos(\phi)\vec{x}_2 + \sin(\phi)(\vec{p} \times (\vec{x}_1 + \vec{x}_2)) \\ &= \cos(\phi)\vec{x}_2 + \sin(\phi)(\vec{p} \times \vec{x}) \end{aligned}$$

Na kraju dobijamo koordinate tačke M' :

$$[M']_{Oe} = [\overrightarrow{OM'}]_e = [\overrightarrow{OO'}]_e + [\overrightarrow{O'M'}]_e = (pp^T)x + \cos(\phi)(E - pp^T)x + \sin(\phi)\vec{p} \times x$$

Možemo da izdvojimo matricu $[R_p(\phi)]_e = p \cdot p^T + \cos(\phi) \cdot (E - p \cdot p^T) + \sin(\phi) \cdot \vec{p} \times$ koju nazivamo Rodríguezova formula.

Refleksija u odnosu na ravan koja sadrži O : Neka je dat ON reper Oe α ravan koja prolazi kroz O zadata jediničnim normalnim vektorom \vec{p} i neka je data tačka M na koju hoćemo da primenimo refleksiju u odnosu na ravan i neka se tom refleksijom dobija tačka M' . Neka je $\alpha \cap MM' = \{O'\}$. Dobijamo $\overrightarrow{OM'} = \overrightarrow{OM} + \overrightarrow{MM'} = \overrightarrow{OM} - 2\overrightarrow{O'M}$. Neka su sa p i x označene koordinate vektora \vec{p} i \overrightarrow{OM} .

Analogno sa pitanjem za Rodríguezovu formulu:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{O'M} &= \lambda \vec{p} \\ \vec{p} \cdot \overrightarrow{O'M} &= \vec{p} \cdot (\overrightarrow{O'O} + \overrightarrow{OM}) = \vec{p} \cdot \overrightarrow{OM} = \lambda \end{aligned}$$

Odavde, u koordinatama dobijamo $[\overrightarrow{O'M}]_e = (pp^T)x$. Na kraju dobijamo koordinate preslikane tačke:

$$[\overrightarrow{OM'}]_e = Ex - 2(pp^T)x$$

Možemo da izdvojimo matricu: $[S_\alpha]_e = E - 2pp^T$ koju nazivamo matrica refleksije u odnosu na ravan.

Prva Ojlerova teorema: Svako kretanje koje ima fiksiranu tačku O' se može predstaviti kao rotacija oko neke orijentisane prave koja sadrži tačku O' .

Druga Ojlerova teorema: Svako kretanje koje fiksira O se može izraziti kao kompozicija tri sopstvene rotacije oko koordinatnih osa: $R_{Ox_2}(\phi) \circ R_{Oy_1}(\theta) \circ R_{Oz}(\psi)$ gde su uglovi $\phi, \psi \in [0, 2\pi)$, $\theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$. Uglovi ϕ, θ, ψ se nazivaju Ojerovi uglovi. Prvom rotacijom se $Oxyz$ slika u $Ox_1y_1z_1$, drugom rotacijom u $Ox_2y_2z_2$ i trećom rotacijom u $Ox_3y_3z_3$.

Veza sopstvenih i svetskih koordinata: $[R_{Ox_2}(\phi) \circ R_{Oy_1}(\theta) \circ R_{Oz}(\psi)]_e = R_{Oz}(\psi) \circ R_{Oy}(\theta) \circ R_{Ox}(\phi)$.

Slučaj zaključanog žiroskopa: Javlja se kada se ravni Oxy i Oy_3z_3 poklope. Tada je $|Oz| = |Ox_3|$ zbog čega imamo jedan stepen slobode manje.

2.12 Kvaternioni

Definicija, sabiranje, množenje, osobine, inverzni kvaternion, primeri, konjugacija kvaternionom i izometrije.

Definicija kvaterniona: $\mathbb{H} = \{xi + yj + zk + w \mid x, y, z, w \in \mathbb{R}\}$, gde su i, j i k imaginarne jedinice.

Sabiranje kvaterniona: Normalno.

Množenje kvaterniona: $ij = k = -ji$ i $i^2 = j^2 = k^2 = -1$.

Realni i imaginarni deo: Realni deo: $\mathcal{R}(q) = w$, imaginarni deo: $\mathcal{I}(q) = xi + yj + zk = \vec{v}$. Važi $q = xi + yj + zk + w = \mathcal{I}(q) + \mathcal{R}(q) = [(x, y, z), w] = [\vec{v}, w]$.

Osobine:

$$(1) \quad q + q_1 = [\vec{v}, w] + [\vec{v}_1, w_1] = [\vec{v} + \vec{v}_1, w + w_1]$$

$$(2) \quad qq_1 = [\vec{v}, 0][\vec{v}_1, 0] = [\vec{v} \times \vec{v}_1, -\langle \vec{v}, \vec{v}_1 \rangle]$$

$$(3) \quad qq_1 = [\vec{v}, w_1][\vec{v}_1, w_1] = [\vec{v} \times \vec{v}_1 + w\vec{v}_1 + w_1\vec{v}, ww_1 - \langle \vec{v}, \vec{v}_1 \rangle]$$

Napomena: $\langle \vec{v}, \vec{u} \rangle$ je drugi zapis za skalarni proizvod.

Konjugovani kvaternion: $\bar{q} = -xi - yj - zk + w$.

Inverzni kvaternion: $qq^{-1} = 1$. Osobina: $q\bar{q} = |q|^2 \implies q^{-1} = \frac{\bar{q}}{|q|^2}$.

Konjugacije kvaternionom: Svaki kvaternion različit od nule određuje konjugaciju: $C_q = qpq^{-1}$. Dve konjugacije su iste ako i samo ako važi $q = \lambda h$, gde je $\lambda \in \mathbb{R}$. Konjugacija kvaternionom **Izometrije:** $q = [\vec{v} \sin(\frac{\alpha}{2}), \cos(\frac{\alpha}{2})]$ je rotacija oko jediničnog vektora \vec{v} za ugao α u pozitivnom smeru.

2.13 Afina geometrija ravni

Predstavljanje prave, razne jednačine pravih, normalni vektor prave, vektor pravca prave, presek dve prave zadate jednačinama, presek pravih zadatih tačkom i vektorom pravca (dokaz), presek dve duži, parametarsko zadavanje trougla, paralelograma.

Implicitna jednačina prave: $ax + by + c = 0$.

Parametarska jednačina prave: $M(t) = P + t\vec{p}$.

Normalni vektor: Iz implicitnog zapisa možemo da pročitamo normalni vektor $\vec{n}_p = (a, b)$.

Vektor pravca: Iz parametarskog zapisa možemo da pročitamo vektor pravca \vec{p} .

Presek pravih: Dobija se rešavanjem dve jednačine prave sa dve nepoznate.

Presek dve duži: Duž AB možemo da zadamo parametarski sa $M(t) = A + t\vec{AB}$, $t \in [0, 1]$. Za presek dve duži određujemo tačku preseka kao za prave, a zatim određujemo da li za obe prave važi da je $t \in [0, 1]$.

Parametarsko zadavanje trougla i paralelograma: Trougao možemo da zadamo sa $M(t_1, t_2) = A + t_1\vec{AB} + t_2\vec{AC}$, $t_1, t_2 \in [0, 1]$, $t_1 + t_2 \leq 1$. Paralelogram možemo da zadamo sa $M(t_1, t_2) = A + t_1\vec{AB} + t_2\vec{AC}$, $t_1, t_2 \in [0, 1]$.

2.14 Ravan u prostoru

Zadavanje ravni tačkom i normalnim vektorom (dokaz), skiciranje ravni, specijalni slučajevi ravni, parametarska jednačina ravni, jednačina ravni kroz 3 tačke, primeri.

Zadavanje ravni tačkom i normalnim vektorom: Neka je dat normalni vektor $\vec{n}_\alpha = (a, b, c)^T$ i tačka $P = (x_1, y_1, z_1)$ koja pripada ravni. Posmatrajmo tačku sa ravni $A = (x, y, z)$. Važi da je $\vec{PA} \cdot \vec{n}_\alpha = 0$. Odavde: $\vec{PA} \cdot \vec{n}_\alpha = (x - x_1, y - y_1, z - z_1) \cdot (a, b, c) = ax + by + cz - (ax_1 + by_1 + cz_1) = 0$. Ako obeležimo $d = -(ax_1 + by_1 + cz_1)$ dobijamo $ax + by + cz + d = 0$.

Skiciranje ravni: Skiciranje ravni može da se vrši tako što se prvo izračunaju i označe preseči sa osama.

Parametarska jednačina ravni: $M(t, s) = A + t\vec{v} + s\vec{u}$, gde je A tačka koja pripada ravni, a \vec{v} i \vec{u} su nekolinearni vektori paralelni sa ravni.

Jednačina ravni kroz tri tačke: Ako su date nekolinearne tačke A , B i C , tada je jednačina ravni: $M(t, s) = A + t\vec{AB} + s\vec{AC}$. Ako su tačke kolinearne ne može se jednoznačno odrediti ravan koja ih sadrži.

2.15 Prava u prostoru

Parametarska i "kanonska" jednačina prave, prava AB i podela duži AB na jednake delove, prava kao presek dve ravni, pramen ravni, primeri.

Parametarska jednačina: $M(t) = A + t\vec{p}$, gde je A tačka na pravoj, a \vec{p} je vektor pravca.

"Kanonska" jednačina: "Kanonska" je pod navodnicima jer nešto što je kanonsko bi trebalo da bude jedinstveno, ali ova jednačina nije jedinstvena. Kanonska jednačina prave: $\frac{x-x_0}{p_x} = \frac{y-y_0}{p_y} = \frac{z-z_0}{p_z} = t$.

Prava AB: Ako su date dve različite tačke A i B možemo jednoznačno da odredimo pravu koja prolazi kroz njih formulom $M(t) = A + t\vec{AB}$.

Podela duži AB na jednake delove: Ako želimo da podelimo duž AB na n jednakih delova i želimo da nađemo m -tu tačku podele to radimo po formuli: $T_m = A + \vec{AB} \cdot \frac{m}{n}$, važi da je $T_0 = A$ i $T_n = B$.

Prava kao presek dve ravni: Dobija se kao rešenje sistema dve jednačine od tri nepoznate. Može da nema rešenja (ravni su paralelne), ima beskonačno mnogo rešenja koja formiraju pravu (ravni se seku po pravoj) ili ima beskonačno mnogo rešenja koja formiraju ravan (ravni se poklapaju).

Pramen ravni: Ako se dve ravni seku po pravoj, njihovom linearnom kombinacijom se dobija svaka ravan koja sadrži tu pravu i ovo se naziva pramen ravni. U opštem primeru, neka je $\alpha : a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0$ i $\beta : a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0$. Tada je pramen ravni: $\lambda_1 \cdot (a_1x + b_1y + c_1z + d_1) + \lambda_2(a_2x + b_2y + c_2z + d_2) = 0$.

2.16 Međusobni položaji pravih i ravni

Međusobni položaji dve prave (zadatih tačkom i vektorom pravca) u prostoru, međusobni položaj prave i ravni, međusobni položaji dve ravni, mimoilazne prave, zajednička normala - T4.3 (dokaz), rastojanje mimoilaznih pravih - T4.4 (dokaz).

Međusobni položaj dve prave: Dve prave mogu da budu paralelne, mimoilazne, da se poklapaju i da se seku. Možemo da rešavamo dve jednačine sa dve nepoznate. Ako postoji jedno rešenje onda se seku. Ako postoji beskonačno mnogo rešenja onda se poklapaju. Ako nema rešenja a vektori su kolinearni onda su prave paralelne. Ako ništa od prethodnog ne važi onda su mimoilazne.

Međusobni položaj prave i ravni: Prava i ravan mogu da budu paralelne, da se seku ili da ravan sadrži pravu. Ako sistem jednačina ima jedinstveno rešenje onda se seku, ako ima beskonačno mnogo rešenja onda ravan sadrži pravu, inače su paralelne.

Međusobni položaj dve ravni: Dve ravni mogu da se poklapaju, budu paralelne ili da se seku. Slučajevi su analogni slučajevima međusobnog položaja prave i ravni.

Mimoilazne prave Prave preko kojih ne može da se postavi ravan.

T4.3: Mimoilazne prave p i q imaju jedinstvenu zajedničku normalu.

Dokaz: Neka su date prave p i q . Vektor pravca prave n koja je normalna na obe prave će biti $\vec{p} \times \vec{q}$ gde su \vec{p} i \vec{q} vektori pravca pravih p i q . Sve prave čiji su vektori pravca ortogonalni i sa \vec{p} i sa \vec{q} i koje seku pravu p će pripadati ravni α koja se konstruiše jednom tačkom sa prave p i vektorima \vec{p} i $\vec{p} \times \vec{q}$. Analogno možemo da konstruišemo ravan β koja će sadržati sve prave čiji su vektori pravca ortogonalni i sa \vec{p} i sa \vec{q} i koje seku pravu q . Presek ove dve ravni će biti prava n koja je jedinstvena jer su p i q mimoilazne. Prava n je normalna na prave p i q jer je njen koeficijent pravca $\vec{p} \times \vec{q}$ i seče ih po konstrukciji.

T4.4 Rastojanje između mimoilaznih pravih je: $\frac{\|\vec{p}, \vec{q}, \vec{PQ}\|}{|\vec{p} \times \vec{q}|}$ gde su P i \vec{p} tačka i vektor pravca prave p , a Q i \vec{q} tačka i vektor pravca prave q .

Dokaz: U brojiocu je zapravo zapremina paralelopipeda, a u imeniocu je površina baze pa se deljenjem tačno dobija visina koju tražimo.

2.17 Projekcije

Normalna projekcija na ravan Oxy (je linearno preslikavanje), normalna projekcija na proizvoljnu ravan (dokaz), centralna projekcija, formule centralne projekcije iz $C(0,0,0)$ na ravan $z = f$, kartografske projekcije, definicija i formule stereografska projekcija.

Normalna projekcija na ravan Oxy : Matrica $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ je matrica normalne

projekcije na ravan Oxy .

Normalna projekcija na proizvoljnu ravan: Neka je α ravan koja prolazi kroz O zadata jediničnim normalnim vektorom \vec{p} i neka je data tačka M koju hoćemo da projektujemo na ravan i neka se tom projekcijom dobija tačka M' . Označimo kolone vektora \vec{p} , \vec{OM} i $\vec{OM'}$ redom sa p, x, x' . Tada, analogno dokazu formule refleksije u odnosu na ravan, dobijamo formulu: $x' = (E - pp^T)x$.

Centralna projekcija: Za centralnu projekciju je potrebno da fiksiramo ravan na koju projektujemo i tačku u odnosu na koju projektujemo (iz koje posmatramo).

Formula centralne projekcije u odnosu na tačku $C(0,0,0)$ na ravan $z = d$: Posmatrajmo proizvoljnu tačku $M(x, y, z)$. Neka je njena projekcija tačka $M'(x', y', z')$. Tada je $x' = \frac{d}{z}x$, $y' = \frac{d}{z}y$ i $z' = \frac{d}{z}z = d$. Ovo možemo izraziti matrično preko homogenih koordinata. Neka je $x' = \frac{x'_1}{x'_4}$, $y' = \frac{x'_2}{x'_4}$ i $z' = \frac{x'_3}{x'_4}$. Tada se centralna projekcija može predstaviti

formulom:
$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \\ x'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Kartografske projekcije: Projektuju zakrivljene površine na ravan.

Stereografska projekcija definicija: Specijalan slučaj centralne projekcije, vrsta kartografske projekcije kojom se jedinična sfera projektuje na ravan. Centar projekcije je neka tačka sfere, a ravan na koju se projektuje tangira sferu.

Stereografska projekcija izvođenje formula: Neka je $C = (0, 0, 1)$ i $z = -1$. Posmatrajmo tačku na lopti $M = (x, y, z)$ i pravu $p(\lambda) = C + \lambda \overrightarrow{CM}$. Važi $x' = \lambda x$, $y' = \lambda y$ i $z' = \lambda z + \lambda = -1$. Odavde dobijamo $\lambda = \frac{1}{1-z}$. Na kraju dobijamo formule stereografske projekcije: $x' = \frac{x}{1-z}$, $y' = \frac{y}{1-z}$ i $z' = -1$.

2.18 Uglovi između pravih i ravni

Merenje uglova (stepeni, radijani, nagib u procentima), ugao između 2 prave, ugao između prave i ravni, ugao između dve ravni, ugao između pljosni tetraedra (na dva načina), računski primeri.

Merenje uglova: Veza stepena i radijana: $180^\circ = \pi$. Radijan predstavlja odnos dužine luka i dužine poluprečnika. Merenje nagiba u procentima: Ako merimo ugao između hipotenuze i jedne katete i dužina te katete je a , a dužina druge katete je b , tada će nagib biti $\frac{b}{a}100\%$. Dakle, ako je dužina jedne katete 1 metar, a dužina druge katete 5 centimetara, tada će nagib hipotenuze biti 5%.

Ugao između dve prave: Određuje se kao ugao između vektora pravca tih pravih.

Ugao između prave i ravni: Određuje se kao $\frac{\pi}{2} - \angle \vec{n}_\alpha \vec{p}$ gde je \vec{n}_α normalni vektor ravni, a \vec{p} vektor pravca prave.

Ugao između dve ravni: Ugao između njihovih normalnih vektora.

Ugao između pljosni tetraedra:

- (1) Posmatrajmo jediničnu kocku $ABCD A'B'C'D'$. Tačke A, C, B' i D' formiraju pravilni tetraedar. Lako možemo da odredimo koordinate ovih tačaka.
- (2) Posmatrajmo pravilni jedinični tetraedar $ABCD$. Označimo sredinu stranice AB sa M . Izdvojimo trougao MDC . Zanima nas ugao $\angle CMD$. Važi $|MD| = \frac{\sqrt{3}}{2}$, $|DC| = 1$ i $|MC| = \frac{\sqrt{3}}{2}$. Preko kosinusne teoreme za trougao CMD kod ugla $\angle CMD$ dobijamo $|DC|^2 = |MD|^2 + |MC|^2 - 2|MD||MC|\cos(\angle CMD)$, odakle je $\angle CMD = \arccos(\frac{1}{3})$.

2.19 Rastojanja

Rastojanje između tačke i prave (sa izvođenjem), rastojanje između tačke i ravni (dokaz), rastojanje između mimoilaznih pravih (pitanje 16).

Rastojanje između tačke i prave: Neka je data prava p i tačka A čije rastojanje se traži. Možemo da izaberemo neku tačku P na pravoj i da izračunamo površinu paralelograma zadatog vektorima: \overrightarrow{AB} i \vec{p} . Tada se tražena visina dobija formulom $d(A, p) = \frac{|\overrightarrow{AB} \times \vec{p}|}{|\vec{p}|}$.

Rastojanje između tačke i ravni: Potpuno analogno osim što se umesto površine i dužine koristi zapreina i površina.

Rastojanje između mimoilaznih pravih: [pitanje 16](#).

2.20 Prodor prave kroz trougao

Uslov da prava prodire trougao (objašnjenje), određivanje prodorne tačke, primer. Presek trougla i ravni.

Uslov da prava prodire trougao (objašnjenje): Neka je dat trougao ABC i prava p određena tačkom P i vektorom \vec{p} . Označimo sa \vec{u} , \vec{v} i \vec{w} vektore \vec{PA} , \vec{PB} i \vec{PC} . Možemo da odredimo orijentaciju vektora $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{p})$, $(\vec{v}, \vec{w}, \vec{p})$ i $(\vec{w}, \vec{u}, \vec{p})$. Ako su sve iste orijentacije, onda će presek pripadati trouglu. Orijetacije određujemo mešovitim proizvodom. Specijalno, ako je tačno jedan od mešovitih proizvoda jednak nula, tada će presek biti na nekoj od stranica. Ako je mešoviti proizvod neka dva jednak nula tada će tačka preseka biti podudarna sa jednim od temena.

Određivanje prodorne tačke: Označimo sa M presek ravni koja sadrži trougao sa pravom p . Tada će važiti $0 = [\vec{AB}, \vec{AC}, \vec{AM}]$ jer su ovi vektori komplanarni i neka je $\vec{AB} = \vec{v} - \vec{u}$, $\vec{AC} = \vec{w} - \vec{u}$ i $\vec{AM} = t\vec{p} - \vec{u}$. Iz jednakosti dobijamo:

$$\begin{aligned} 0 &= [\vec{v} - \vec{u}, \vec{w} - \vec{u}, t\vec{p} - \vec{u}] \\ &= [\vec{v}, -\vec{u}, -\vec{u}] + [\vec{v}, -\vec{u}, t\vec{p}] + [\vec{v}, \vec{w}, -\vec{u}] + [\vec{v}, \vec{w}, t\vec{p}] \\ &\quad + [-\vec{u}, -\vec{u}, -\vec{u}] + [-\vec{u}, -\vec{u}, t\vec{p}] + [-\vec{u}, \vec{w}, -\vec{u}] + [-\vec{u}, \vec{w}, t\vec{p}] \\ &= [\vec{v}, -\vec{u}, t\vec{p}] + [\vec{v}, \vec{w}, -\vec{u}] + [\vec{v}, \vec{w}, t\vec{p}] + [-\vec{u}, \vec{w}, t\vec{p}] \\ &= -[\vec{v}, \vec{w}, \vec{u}] - t[\vec{v}, \vec{u}, \vec{p}] + t[\vec{v}, \vec{w}, \vec{p}] - t[\vec{u}, \vec{w}, \vec{p}] \\ [\vec{v}, \vec{w}, \vec{u}] &= t([\vec{v}, \vec{w}, \vec{p}] - [\vec{v}, \vec{u}, \vec{p}] - [\vec{u}, \vec{w}, \vec{p}]) \end{aligned}$$

odakle dobijamo traženu formulu $t = \frac{[\vec{v}, \vec{w}, \vec{u}]}{[\vec{v}, \vec{w}, \vec{p}] + [\vec{u}, \vec{v}, \vec{p}] + [\vec{w}, \vec{u}, \vec{p}]}$.

Presek trougla i ravni: Trougao i ravan mogu da se ne seku, da trougao pripada ravni, da trougao dodiruje ravan ivicom, da trougao dodiruje ravan temenom ili da trougao seče ravan po duži. Prvo odredimo da li neka od tačaka pripada ravni. Ako sve tri pripadaju onda trougao pripada ravni, ako tačno dve pripadaju onda ivica trougla pripada ravni. Ako samo jedna pripada ne možemo ništa da zaključimo dok ne proverimo da li naspramna ivica seče ravan, ako seče onda trougao seče ravan, ako ne seče onda trougao dodiruje ravan temenom. Ako ništa od ovoga nije ispunjeno onda proveravamo da li ivice seku ravan. Tačno dve ivice će seći ravan, ili nijedna ivica neće seći ravan. Ako tačno dve ivice seku ravan onda možemo da odredimo duž po kojoj se trougao i ravan seku. Ako nijedna ivica ne seče ravan onda se ravan i trougao ne seku.

2.21 Konusni preseki

Definicija konusnog preseka, konika, teorema o žiži i direktrisi (formulacija), konusni preseki u prirodi (kosi hitac, Keplerovi zakoni (formulacije), senka kruga, tj. sfere).

Definicija konusnog preseka: Neka se prave s i i seku u tački T . Konus se dobija kada se oko prave s rotira prava i . Prava s se naziva osa, rotirana prava i u raznim položajima izvodnica, a tačka T teme konusa. Konusni preseki su svi preseki koji se dobijaju pri preseku konusa i ravni.

Konika: Konusni presek koji ne sadrži teme konusa. Konike su krug, elipsa, parabola i hiperbola.

Teorema o žiži i direktrisi: U ravni α konike postoje prava d (direktrisa) i tačka F (žiža) takve da za svaku tačku konike M važi $const = e = \frac{|MF|}{d(M,d)}$. Broj e se naziva ekscentricitet konike i važi:

- (1) za $e = 0$ krug;
- (2) za $0 < e < 1$ elipsa;
- (3) za $e = 1$ parabola;
- (4) za $e > 1$ hiperbola.

Kosi hitac: Putanja kosog hica ima oblik parabole.

Prvi Keplerov zakon: Planete oko Sunca opisuju eliptične putanje, pri čemu se Sunce nalazi u zajedničkoj žiži.

Drugi Keplerov zakon: Planeta formira jednake površine odsečka elipse sa Suncem u jednakim vremenskim intervalima.

Treći Keplerov zakon: Kvadrati perioda obilaska planeta oko Sunca srazmerni su kubu veće poluose elipse.

Senke kruga: Senka kružnog predmeta na ravnom zidu je konika. Zid će zapravo biti ravan koja seče "konus" formiran od svetlosti koju emituje kružni predmet.

2.22 Elipsa

Osnovni elementi elipse, Fokusna osobina elipse: formulacija, skica, (dokaz), parametarska jednačina elipse.

Poluose elipse: Za poluose a i b važi $a > b > 0$.

Žiže elipse: Tačke $F_1(\sqrt{a^2 - b^2}, 0)$ i $F_2(-\sqrt{a^2 - b^2}, 0)$.

Ekscentricitet elipse: $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$.

Direktrise elipse: $d_1 : x = \frac{a}{\sqrt{a^2 - b^2}}$ i $d_2 : x = -\frac{a}{\sqrt{a^2 - b^2}}$.

Kanonska jednačina elipse: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$.

Fokusne osobine elipse: Za proizvoljnu tačku M važi $|MF_1| + |MF_2| = 2a$.

Dokaz: Neka za tačku $M(x, y)$ važi $|MF_1| + |MF_2| = p$. Za $|MF_1|$ i $|MF_2|$ važe jednakosti $|MF_1| = \sqrt{y^2 + (x - \sqrt{a^2 - b^2})^2}$ i $|MF_2| = \sqrt{y^2 + (x + \sqrt{a^2 - b^2})^2}$. Iz jednačine elipse dobijamo $y^2 = b^2 - \frac{b^2}{a^2}x^2$. Dobijamo jednakosti:

$$\begin{aligned}
 p &= |MF_1| + |MF_2| \\
 &= \sqrt{y^2 + (x - \sqrt{a^2 - b^2})^2} + \sqrt{y^2 + (x + \sqrt{a^2 - b^2})^2} \\
 &= \sqrt{y^2 + x^2 + a^2 - b^2 - 2x\sqrt{a^2 - b^2}} + \sqrt{y^2 + x^2 + a^2 - b^2 + 2x\sqrt{a^2 - b^2}} \\
 &= \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2}x^2 + x^2 + a^2 - b^2 - 2x\sqrt{a^2 - b^2}} + \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2}x^2 + x^2 + a^2 - b^2 + 2x\sqrt{a^2 - b^2}} \\
 &= \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}x^2 + a^2 - 2x\sqrt{a^2 - b^2}} + \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}x^2 + a^2 + 2x\sqrt{a^2 - b^2}} \\
 p^2 &= 2\left(\frac{a^2 - b^2}{a^2}x^2 + a^2\right) + 2\sqrt{\left(\frac{a^2 - b^2}{a^2}x^2 + a^2\right)^2 - 4x^2(a^2 - b^2)} \\
 &= 2\left(\frac{a^2 - b^2}{a^2}x^2 + a^2\right) + 2\sqrt{\left(a^2 - \frac{a^2 - b^2}{a^2}x^2\right)^2} \\
 &= 2\left(\frac{a^2 - b^2}{a^2}x^2 + a^2\right) + 2\left(a^2 - \frac{a^2 - b^2}{a^2}x^2\right) \\
 &= 4a^2 \\
 p &= 2a
 \end{aligned}$$

Skiciranje: Ova osobina se koristila za skiciranje elipsi. Na ravnoj podlozi se pričvrste dva eksera na udaljenosti $2\sqrt{a^2 - b^2}$ i za njih se veže kanap dužine $2a$. Trag olovke koji drži kanap zategnutim će predstavljati elipsu.

Parametarska jednačina elipse: $x = a \cos(\phi)$, $y = b \sin(\phi)$, $\phi \in [0, 2\pi)$, ugao ϕ ne predstavlja ugao između vektora položaja i x ose.

2.23 Hiperbola

Osnovni elementi hiperbole, fokusna osobina hiperbole: formulacija, skica, parametarska jednačina hiperbole.

Poluose hiperbole: Za poluose a i b važi $a, b > 0$.

Žiže hiperbole: Tačke $F_1(\sqrt{a^2 + b^2}, 0)$ i $F_2(-\sqrt{a^2 + b^2}, 0)$.

Ekscentricitet hiperbole: $e = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{a}$.

Direktrise hiperbole: $d_1 : x = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}$ i $d_2 : x = -\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}$.

Asimptote hiperbole: $a_1 : y = \frac{b}{a}x$ i $a_2 : y = -\frac{b}{a}x$.

Kanonska jednačina hiperbole: $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$.

Fokusne osobine hiperbole: Za proizvoljnu tačku M važi $||MF_1| - |MF_2|| = 2a$.

Skiciranje: Možemo da opišemo krug poluprečnika $2a$ oko tačke F_1 . Zatim postavljamo drugi krug proizvoljnog poluprečnika oko tačke M tako da dodiruje tačku F_2 i prvi krug. Ovako dobijamo sve tačke sa jedne polovine hiperbole. Analogno dobijamo i za drugu polovinu hiperbole.

Parametarska jednačina hiperbole: $x = \pm a \cosh(\phi)$, $y = b \sinh(\phi)$, $\phi \in \mathbb{R}$.

2.24 Parabola

Osnovni elementi parabole, fokusna osobina parabole, putanja kosog hica je parabola (izvođenje putanje, domet, maksimalna visina, vreme leta...)

Parametar parabole: Broj p .

Žiže parabole: Tačka $F(\frac{p}{2}, 0)$.

Direktrisa parabole: $d: x = -\frac{p}{2}$.

Osa parabole: Prava o .

Jednačina parabole: $y^2 = 2px$.

Fokusna osobina hiperbole: Svaka tačka parabole je jednako udaljena od žiže i od direktrise.

Putanja kosog hica je parabola: Pretpostavimo da ispaljujemo kosi hitac sa početnom brzinom $\vec{v}_0 = (v_{0x}, v_{0y})^T$. Na njega deluje samo gravitacija, dakle $\vec{a} = (0, -g)^T$. Ovo možemo da zapišemo i kao $a(t) = (0, -g)$. Integraljenjem dobijamo $v(t) = (cv_x, -gt + cv_y)$. Za $t = 0$ dobijamo $v(0) = (cv_x, cv_y) = (v_{0x}, v_{0y})$. Još jednim integraljenjem dobijamo $s(t) = (v_{0x}t + cs_x, v_{0y}t - \frac{gt^2}{2} + cs_y)$. Za $t = 0$ dobijamo $s(0) = (cs_x, cs_y) = (0, 0)$. Dobijamo da je jednačina kosog hica $s(t) = (v_{0x}t, v_{0y}t - \frac{gt^2}{2})$. Važi da je $x = v_{0x}t$, odakle dobijamo $t = \frac{x}{v_{0x}}$. Sada za y imamo $y = v_{0y}t - \frac{gt^2}{2} = v_{0y}\frac{x}{v_{0x}} - \frac{gx^2}{2v_{0x}^2} = x\frac{v_{0y}}{v_{0x}} - x^2\frac{g}{2v_{0x}^2}$. Ovo je oblik parabole.

Domet kosog hica i vreme leta: Domet se dobija kada je $y = t(v_{0y} - \frac{gt}{2}) = 0$. Nas zanima $t \neq 0$, dakle $t = 2\frac{v_{0y}}{g}$. Ovim dobijamo vreme leta. Da bismo izračunali domet potrebno je da izračunamo x za vreme leta. Dobijamo $x = \frac{2v_{0x}v_{0y}}{g}$.

Maksimalna visina kosog hica: Maksimalna visina se dobija za $v_{0y} = 0$. Dakle, $0 = v_{0y} - gt$ odakle dobijamo $t = \frac{v_{0y}}{g}$. Maksimalna visina je $y = \frac{v_{0y}^2}{2g}$.

2.25 Optičke osobine krivih drugog reda

Optička osobina parabole (objašnjenje, skica, dokaz, primene), optička osobina elipse i hiperbole.

Optička osobina parabole: Zraci koji izviru iz žiže parabole se odbijaju paralelno sa osom parabole.

Dokaz: Označimo sa $F(\frac{p}{2}, 0)$ žižu parabole, neka se zrak odbija od parabole u tački M i neka prolazi kroz tačku R . Neka tangenta t iz tačke M seče osu u tački $Q(x_0, y_0)$. Važi da je $|FQ| = \frac{p}{2} + x_0$ i da je $|FM| = d(M, d) + x_0 = \frac{p}{2} + x_0$. Dakle trougao FQM je jednakokraki iz čega zaključujemo da je $\angle FQM = \angle FMQ$. Iz zakona odbijanja svetlosti zaključujemo da je i $\angle(RM, t) = \angle FMQ$ što smo i hteli.

Primena: Ako parabolu rotiramo oko njene ose dobijamo rotacioni paraboloid. On se primenjuje u radarima (u kojima se prijemnik postavi u žižu), farovi automobila, reflektori, itd.

Optička osobina elipse: Svetlosni zrak koji izvire iz jedne žiže elipse se odbija i prolazi kroz drugu žižu.

Optička osobina hiperbole: Svetlosni zrak koji izvire iz jedne žiže hiperbole i odbija se je kolinearan sa drugom žižom.

2.26 Krive drugog reda

Definicija, primeri, svodenje krive drugog reda na kanonski oblik dokaz, nameštanje na pune kvadrate, primer svodjenja parabole i "xy" hiperbole.

Definicija krive drugog reda: Skup tačaka koje zadovoljavaju jednačinu drugog stepena: $a_{11}x^2 + a_{12}xy + a_{22}y^2 + a_{13}x + a_{23}y + a_{33} = 0$.

Svodenje krive drugog reda na kanonski oblik: Kanonski oblici su formula elipse ($\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$), hiperbole ($\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$), parabole ($y^2 = 2px$), praznog skupa ($\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = -1$), tačke ($\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 0$), dve prave koje se seku ($\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 0$), dve paralelne prave ($x^2 = a^2$), "dvostruke" prave ($x^2 = 0$), prazan skup ($x^2 = -a^2$). Nekim kretanjem se bilo koja jednačina može svesti na tačno jedan od ovih oblika.

Dokaz: Rotacijom možemo da eliminišemo član uz xy , a zatim dopunom do punog kvadrata i translacijom možemo da dobijemo neki od kanonskih oblika.

Nameštanje na pune kvadrate: Jednačinu $ax^2 + bx + c = 0$ možemo da namestimo na pun kvadrat sledećim postupkom $a(x^2 + \frac{b}{a}x + \frac{c}{a}) = a(x^2 + 2\frac{b}{2a}x + \frac{b^2}{4a^2} - \frac{b^2}{4a^2} + \frac{c}{a}) = a(x + \frac{b}{2a})^2 - \frac{b^2}{4a} + c = 0$.

2.27 Bezijeove krive

Difinicija, B. kriva stepena jedan je duž, B. krive stepena dva i tri (skica), matrični zapis, osobine B. krivih, Primer: B. kriva kroz $P_0(1, 1)$, $P_1(-1, 0)$, $P_2(1, -1)$, dokaz da je B. kriva stepena 2 parabola, De Kasteljau algoritam, Racionalna parametrizacija kruga, primer fraktala

Definicija Bezijeove krive: Neka su tačke P_0, \dots, P_n , $n \geq 2$ tačke ravni. Bezijeova kriva stepena n je:

$$\alpha_n(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} P_i = \sum_{i=0}^n B_i^n(t) P_i, \quad t \in [0, 1]$$

B_i je Bernštajnov polinom.

Bezijeova kriva stepena jedan je duž: Neka su date tačke P_0 i P_1 . Za Bezijeovu krivu dobijamo $\alpha_n(t) = (1-t)P_0 + tP_1 = P_0 + t\overrightarrow{P_0P_1}$. Ovo je duž po definiciji.

Bezijeove krive stepena dva i tri (skica): Za $n = 2$ se dobija $\alpha_2(t) = (1-t)^2P_0 + 2t(1-t)P_1 + t^2P_2$. Za $n = 3$ se dobija $\alpha_3(t) = (1-t)^3P_0 + 3t(1-t)^2P_1 + 3t^2(1-t)P_2 + t^3P_3$.

Matrični zapis: Da bismo odredili matrični zapis prvo odredimo šta stoji uz svaku od tačaka. Za $n = 2$ će matrični zapis biti $\alpha_2(t) = (1, t, t^2) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 2 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \end{pmatrix}$.

Osobine Bezijeovih krivih:

- (1) Najveći stepen α_n je n .
- (2) Važi $\alpha_n(0) = P_0$ i $\alpha_n(1) = P_n$.
- (3) Tangentni vektor u P_0 je $\overrightarrow{P_0P_1}$, a u P_n je $\overrightarrow{P_{n-1}P_n}$.
- (4) Osobina nenegativnosti je da su svi Bernštajnovi polinomi nenegativni.
- (5) Osobina konveksnog omotača je da Bezijeova kriva pripada konveksnom omotaču kontrolnog polinoma.
- (6) Osobina manje varijacije kaže da će za bilo koju pravu broj preseka sa Bezijeovom krivom biti manji ili jednak od broja preseka sa kontrolnim omotačem.
- (7) Afina invarijantnost kaže da ćemo ako preslikamo sva temena nekim afinim preslikavanjem, a zatim odredimo tačku $\alpha'_n(t_0)$ dobiti istu tačku kao da smo preslikali tačku $\alpha_n(t_0)$ istim afinim preslikavanjem.

Bezijeova kriva kroz $P_0(1, 1)$, $P_1(-1, 0)$, $P_2(1, -1)$: Imamo da je:

$$\begin{aligned}\alpha_2(t) &= (1-t)^2 P_0 + 2t(1-t)P_1 + t^2 P_2 \\ &= (1-t)^2(1, 1) + 2t(1-t)(-1, 0) + t^2(1, -1) \\ &= ((1-t)^2 - 2t(1-t) + t^2, (1-t)^2 - t^2) \\ &= (t^2 - 2t + 1 - 2t + 2t^2 + t^2, t^2 - 2t + 1 - t^2) \\ &= (4t^2 - 4t + 1, -2t + 1)\end{aligned}$$

Primetimo da smo dobili $x = y^2$ što je jednačina parabole.

Dokaz da je Bezijeova kriva stepena 2 parabola: Neka su date tačke Q_0 , Q_1 i Q_2 . Ove tačke možemo preslikati u tačke P_0 , P_1 i P_2 iz prethodnog primera. Zbog osobine afine invarijantnosti će se i Bezijeova kriva preslikati. S obzirom da je Bezijeova kriva formirana tačkama P_0 , P_1 i P_2 parabola, tada je i Bezijeova kriva formirana tačkama Q_0 , Q_1 i Q_2 takođe parabola.

De Kasteljau algoritam: Iterativni algoritam. Želimo da bez računanja polinoma nađemo tačku $\alpha_n(t_0)$. U nultom koraku će $P_{00} = P_0, \dots, P_{0n} = P_n$. U i -tom koraku konstruišemo tačke tako da $P_{i-1j}P_{ij} : P_{ij}P_{i-1j+1} = t_0 : (1-t_0)$ i da tačka P_{ij} pripada duži $P_{i-1j}P_{i-1j+1}$. Poslednja tačka koju dobijemo je tražena tačka.

Racionalna parametrizacija kruga: $x = \frac{1-t^2}{1+t^2}$, $y = \frac{2t}{1+t^2}$, $t \in [0, 1]$.

Fraktali: Kohova kriva, Hilbertova kriva, Peanova kriva.

2.28 Poligoni

Definicija, temena, ivice, dijagonale, prost poligon, unutrašnjost prostog poligona, površina poligona (primer, objašnjenje).

2.29 Konveksni omotač

Pojam konveksnog skupa, konveksni omotač skupa tačaka, jednostavni algoritam, primer.

2.30 Triangulacija poligona

Definicija triangulacije, primeri, svaki poligon ima unutrašnju dijagonalu (dokaz), teorema o triangulaciji prostog poligona (crtež, objašnjenje, (dokaz)).

2.31 Poliedarske površi

Definicija, poliedar, primeri, tabela povezanosti, rub (primeri odredjivanja).

2.32 Orijehtacija poliedarske površi

Definicija orijentacije, primer orijentisanja tetraedra, veza orijentacije i normale, Mebi-jusova traka, dokaz da nije orijentabilna, rod poliedra, Ojlerova karakteristika, primer (sfera i torus).

2.33 Platonova tela

Definicija, skiciranje tetraedra, heksaedra, oktaedra, dualno Platonovo telo, Ojlerova karakteristika.