Robotsko podprta endoterapija dreves

David Zindović[1], Nika Haler Metelko[1], Jon Muhovič[1], Aljaž Medič[2], Matjaž Mihelj[1], Marko Munih[1], Sebastjan Šlajpah[1]

[1]*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana*
[2]*Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana*
E-pošta: {dz0321, nh57838}@student.uni-lj.si;
{jon.muhovic, matjaz.mihelj, marko.munih, sebastjan.slajpah}@fe.uni-lj.si; aljaz.medic@bf.uni-lj.si

Robotic supported tree endoterapy

This paper presents a robotic system for tree endotherapy, a targeted alternative to conventional spraying that reduces environmental exposure and operator workload. Manual injections on apple trees were analyzed to define key process requirements. Pressure measurements during manual applications showed a median injection pressure of 67 kPa, with excessive pressure causing bark cracking, while penetration-force tests showed a median needle insertion force of 593 N. Based on these results, a three-degree-of-freedom TRT robotic mechanism was developed, integrating RGB-D perception, SAM-based trunk segmentation, injection-point selection, needle insertion, and peristaltic dosing with pressure sensing. The application procedure includes mechanism positioning, controlled insertion, and pressure-limited injection. The proposed system demonstrates the feasibility of precise, automated, and environmentally preferable tree endotherapy.

1 Uvod

Sodobno varstvo rastlin v trajnih nasadih in urbanem drevesnem prostoru se vse bolj usmerja v natančne, ciljne in okoljsko manj obremenjujoče tehnologije. Klasično škropljenje fitofarmacevtskih sredstev je v mnogih primerih učinkovito, vendar je povezano z zanašanjem škropiva, izpostavljenostjo neciljnih organizmov, varnostnimi odmiki, porabo vode in odvisnostjo od vremenskih razmer [1]. Ti izzivi so posebej izraziti pri visokih drevesih, v urbanih okoljih in pri boleznih ali škodljivcih, kjer površinska aplikacija ni tako učinkovita ali mogoča zaradi dostopa. Ena od alternativnih metod je endoterapija dreves, pri kateri se učinkovina vnese neposredno v deblo oziroma v prevodni sistem drevesa [2].

Endoterapija temelji na transportu učinkovine po ksilemu. V deblo se lahko vnašajo insekticidi, fungicidi, biostimulanti, mikrohranila, naravni ekstrakti in biološka sredstva [3]. Namen uporabe je zatiranje škodljivcev, obvladovanje bolezni, izboljšanje vitalnosti dreves, povečanje odpornosti na stres in odpravljanje prehranskih pomanjkanj. V primerjavi s škropljenjem omogoča bolj ciljno aplikacijo, manjšo porabo učinkovin, manjšo izpostavljenost okolja in manjši vpliv na neciljne organizme, zato je posebej zanimiva za okrasno drevje, gozdove, urbano arboristiko in sadjarstvo.

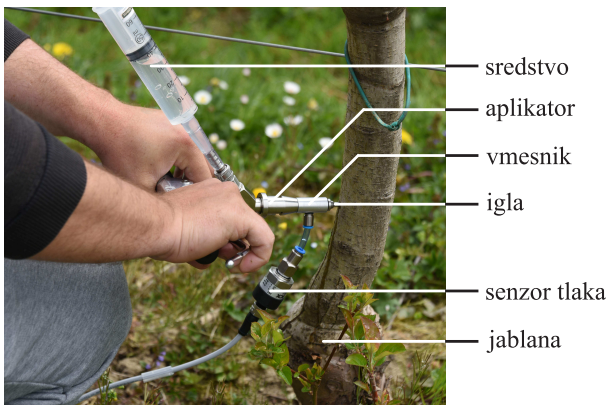
Kljub številnim prednostim ima endoterapija tudi pomembne omejitve [4]. Ročna izvedba je počasna, delovno zahtevna in odvisna od spretnosti operaterja. Poleg tega lahko neustrezna izbira tlaka, globine aplikacije ali mesta injiciranja povzroči poškodbe tkiva, slabšo porazdelitev učinkovine ali neenakomeren terapevtski učinek.

Endoterapija je procesno dobro strukturirana in kot taka primerna za robotizacijo. Ojo s soavtorji [5] je predstavil prototipni mehanizem za avtomatsko endoterapijo citrusov, prizadetih z bakterijo *Candidatus Liberibacter*. Mehanizem sestavljajo linearna pozicionirna roka in dvoprstno orodje z iglama. Predstavili so tudi potrebne sile za vbadanje ter tlak črpanja na primeru citrusov [6]. Maksimalna izmerjena sila za vbod je znašala 5,3 kN, testirali pa so tlake med 0,14 MPa ter 2,31 MPa. Naredili so tudi primerjavo med ročno in avtomatsko endoterapijo, pri čemer je bila slednja približno 80-krat hitrejša [7].

Prispevek obravnava analizo tlaka injiciranja in sile vboda pri ročni endoterapiji. Dobljeni rezultati so osnova za razvoj namenskega robotskega mehanizma. Prikazana je tudi prepoznava drevesa ter izračun mesta vboda, dodatno pa je predstavljen tudi avtomatski potek robotsko podprte endoterapije.

2 Analiza tlaka apliciranja

Za namen avtomatizacije smo analizirali tlak pri katerem se injicira sredstvo v deblo jablane. Pri tem smo

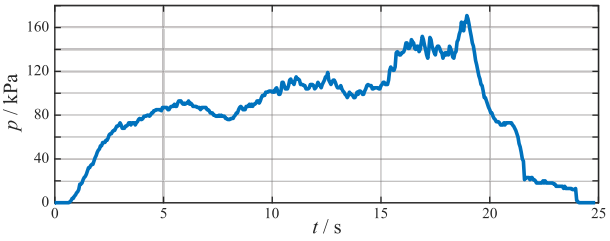


Slika 1: Merilni sistem za merjenje tlaka pri apliciranju sredstva v deblo jablane

uporabili ročni aplikator Wedgle Direct-Inject (ArborSystems, ZDA) z 20 mm konico WedgePlus. Za merjenje tlaka smo izdelali namenski vmesnik, na katerega smo priključili diferencialni senzor tlaka SICK PBT-RB010-SG1SSNAMA0Z z merilnim območjem od 0 kPa do 1 MPa. Tokovni izhod senzorja smo preko merilnega upora brali na analogno–digitalnem vhodu razvojne ploščice Arduino Mega2560 (frekvenca vzorčenja $f_s = 20\,\mathrm{Hz}$), kjer smo izvedli tudi ustrezno pretvorbo iz meritve toka v tlak. Izmerjene vrednosti smo preko serijske povezave pošiljali na prenosni računalnik. Merilni sistem je predstavljen na sliki 1.

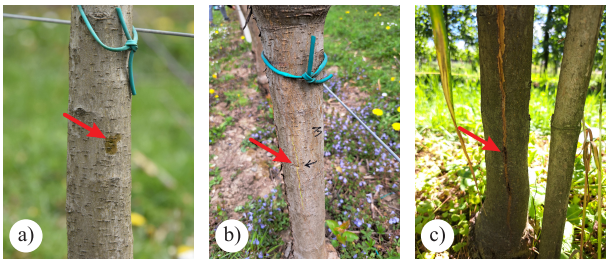
V mesecu maju smo z vodo ročno injicirali 16 jablan. Pri tem je strokovnjak dobil navodilo, da injicira pri nizkem tlaku (tlak injiciranja je povezan s hitrostjo stiskanja vzvodov dozirnega cilidra). Količina injicirane vode je bila 1 ml, kar predstavlja en stisk dozirnega cilindra. Pri tem smo spremljali tlak injiciranja ter označili in dokumentirali mesto vboda.

Na sliki 2 je prikazan tipičen potek tlaka med injiciranjem. Mediana izmerjenih tlakov je znašala 67 kPa, maksimalni tlak pa 659 kPa. Od 16 meritev je bilo 11 meritev z maksimalnim tlakom pod 200 kPa, tri meritve med 240 kPa in 330 kPa ter dve meritvi nad 600 kPa. Povprečen čas apliciranja je bil 32,6 s s standardno deviacijo 7,4 s.



Slika 2: Tipičen potek tlaka p pri apliciranju sredstva v deblo jablane

Na sliki 3 a) je prikazana poškodba na deblu jablane po injiciranju vode pri ustrezno nizkem tlaku. Na sliki 3 b) je bil tlak injiciranja previsok, kar se kaže v nastali razpoki na lubju. Takšna razpoka se je v enem tednu razširila na večji del debla (slika 3 c).



Slika 3: Poškodba na deblu jablane a) takoj po apliciranju sredstva pri nizkem tlaku, b) takoj po apliciranju sredstva pri visokem tlaku, c) en teden po apliciranju sredstva pri visokem tlaku. Mesto vboda je označeno z rdečo puščico.

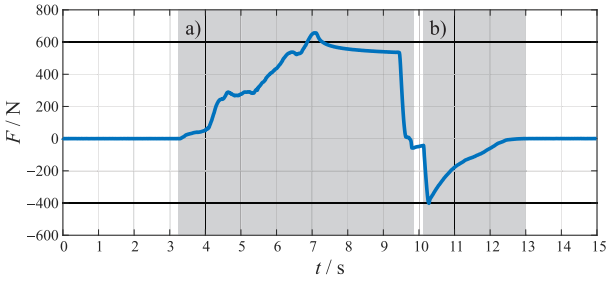
3 Analiza sile vboda

Vbod igle v deblo predstavlja fizično zahtevno delo; proizvajalec je v ta namen aplikatorju priložil drsno kladivo. Za merjenje potrebne sile za vbod smo uporabili namenski merilni sistem (slika 4), sestavljen iz senzorja sil in navorov 30M40A-I50-D (JR3, ZDA, maksmilna sila v smeri z 800 N) z nameščeno 20 mm iglo WedgePlus. Senzor z iglo je bil pritrjen na linerano vodilo ter vpet na linearni motor (sila potiska 1000 N, hitrost 14 mm/s). Motor je bil ročno krmiljen preko razvojne ploščice Nucleo L476RG. Meritve senzorja smo zajemali v simulacijskem okolju Simulink RealTime.



Slika 4: Merilni sistem za merjenje sile pri vbodu v deblo jablane

Z merilnim sistemom smo pomerili 17 vbodov v različne jablane. Tipičen potek sile vboda in izvleka je prikazan na sliki 5. Mediana sile, potrebne za vbod v deblo, je znašala 593 N, medtem ko je bila maksimalna sila vboda 661 N.

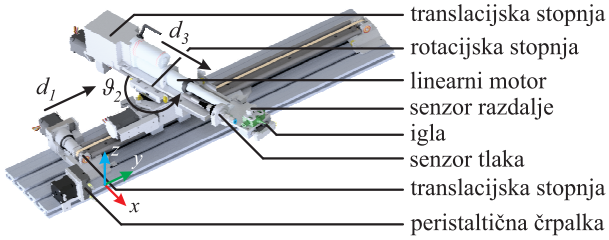


Slika 5: Tipičen potek sile F pri a) vbodu in b) izvleku konice iz debla jablane.

4 Zasnova robotskega mehanizma

Za uspešno injiciranje je potrebno iglo vbosti v deblo v pravilni legi radialno glede na deblo. Za postavitev igle v ustrezno pozicijo (višina vboda je fiksna) in orientacijo potrebujemo mehanizem s tremi prostostnimi stopnjami, kot je TRT mehanizem.

Prva translacijska stopnja je sestavljena iz linearnega vodila Igus WK-10-40-10-01-400 z vozičkom Igus WK-10-40-10 in koračnega motorja 17HS15-1504-ME1K z dodanim reduktorjem s prestavnim razmerjem 50:1, prenos pa je izveden z uporabo zobatega jermena (jermenica 3M 09 Z21 B7, 21 zob, jermen 1.5 GT). Omogoča premik



Slika 6: 3D model prototipa robotskega mehanizma za avtomatsko endoterapijo. Označen koordinatni sistem predstavlja izhodišče mehanizma.

vzdolž osi y. Rotacijska stopnja je nameščena na voziček na prvi translacijski stopnji. Sestavljena je iz polžastega prenosa Igus PRT-02-20-ES, ki ga poganja koračni motor 17HS15-1504-ME1K. S tem je omogočena rotacija okoli osi z, ki je omejena na $\pm 30°$. Druga translacijska stopnja je sestavljena iz linearnega vodila Igus SLW-1040-06-135 z navojnim vretenom (korak 2 mm), ki ga poganja koračni motor 17HS24-2104-ME1K. Vsaka posamezna os ima nameščena tudi končna stikala za inicializacijo začetne lege. Vsakega izmed koračnih motorjev krmili gonilnik StepperOnline CL57-Y.

Lega vrha mehanizma ${}^0T_3$ je podana kot

$$ {}^0T_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & d_3\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & d_1 + d_3\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \quad (1) $$

Na vrh mehanizma smo dodali linearni motor (1000 N potiska, krmiljen preko dvojnega H-mostiča ST X-NUCLEO-IHM04A1), ki potiska linearni voziček, na katerem je nameščen vmesnik za iglo WedgePlus, dotok sredstva ter senzor tlaka. Na vmesniku je nameščen še senzor razdalje (Pololu VL53L0X), ki deluje po principu merjenja časa preleta razdalje, s katerim smo merili globino vboda.

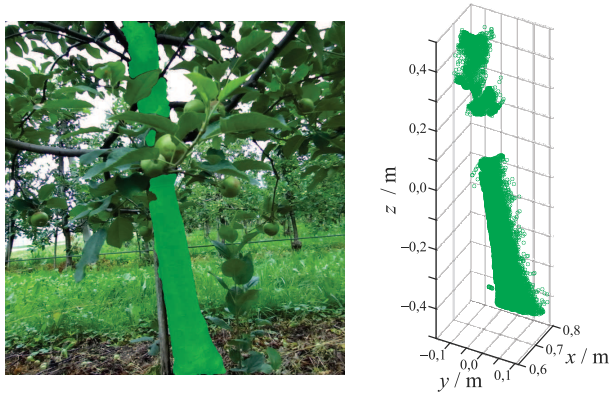
Za apliciranje sredstva smo v sistem umestili še peristaltično črpalko, s katero dosegamo resolucijo apliciranja sredstva 0,06 ml. Črpalka je s cevmi preko hitrih spojk povezana z vmesnikom in iglo na vrhu mehanizma.

Vse krmilnike motorjev sestava krmili razvojna plošča STM32H750B-DK na podlagi podatkov senzorja razdalje, senzorja tlaka in končnih stikal.

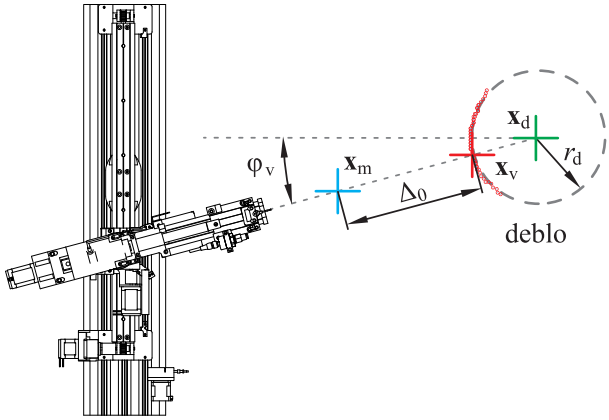
5 Določitev mesta vboda

Za zajem slike jablan smo uporabili RGB-D kamero StereoLabs ZED X. Barvno sliko smo najprej segmentirali z uporabo algoritma SAM 3 [8] ter izločili masko debla (slika 7 levo). Dobljeno masko smo potem superponirali na 3D meritev ter tako izločili oblak točk, ki opisuje obravnavano deblo (slika 7 desno).

Na želeni višini vboda $h_v = 400$ mm smo izločili točke v intervalu ± 2 mm od h_v. Na podlagi teh točk smo z metodo RANSAC aproksimirali deblo s krožnico s središčem $\mathbf{x}_d = [x_d,\, y_d,\, 0]^{\mathrm{T}}$ in polmerom r_d (slika 8).



Slika 7: RGB slika z označeno masko prepoznanega debla (levo) in 3D oblak točk debla (desno)



Slika 8: Aproksimacija debla (siva črtkana krožnica s središčem $\mathbf{x}_d$, zelen križ) je narejena z metodo RANSAC na osnovi zajetih 3D točk (rdeče pike). Na krožnici je označena točka vboda $\mathbf{x}_v$ (rdeč križ), z modrim križem pa je označena vmesna točka postavitve mehanizma $\mathbf{x}_m$.

Na osnovi izbranega kota vboda φ_v določimo koordinate mesta vboda $\mathbf{x}_v$

$$ \mathbf{x}_v = \begin{bmatrix} x_d + r_d\cos\varphi_v \\ y_d + r_d\sin\varphi_v \\ \varphi_v \end{bmatrix} . \quad (2) $$

Na koncu sledi še preračun iz koordinatnega sistema kamere v koordinatni sistem robota

$$ {}^R\mathbf{x}_v = {}^R\mathbf{H}_K\, {}^K\mathbf{x}_v , \quad (3) $$

pri čemer matrika ${}^R\mathbf{H}_K$ predstavlja lego kamere v koordinatnem sistemu robotskega mehanizma in je definirana kot

$$ {}^R\mathbf{H}_K = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_{r,k} \\ 0 & 1 & 0 & d_1 - \frac{d_{1,max}}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4) $$

$d_{r,k}$ predstavlja odmik kamere v smer x koordinatnega sistema robota in znaša 31,9 mm, $d_{1,max}$ pa največji možen premik prve prostostne stopnje, kar je 630 mm.

6 Potek apliciranja

Apliciranje je razdeljeno na štiri faze: 1) postavitev mehanizma, 2) vbod, 3) injiciranje sredsta in 4) izvlek igle.

V prvi fazi iz želene točke vboda $\mathbf{x}_v = [x_v,\, y_v,\, \varphi_v]^{\mathrm{T}}$ določimo točko postavitve vrha mehanizma $\mathbf{x}_m$

$$\mathbf{x}_m = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ \varphi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_v - \Delta_0 \cos\varphi_v \\ y_v - \Delta_0 \sin\varphi_v \\ \varphi_v \end{bmatrix}, \tag{5}$$

pri čemer $\Delta_0 = 10\,\mathrm{mm}$ predstavlja začetni odmik igle od točke vboda na deblu (slika 8). Iz točke $\mathbf{x}_m$ nato izračunamo referenčne vrednosti posameznih sklepov mehanizma:

$$\theta_{2,R} = \varphi_m\,, \tag{6}$$

$$d_{3,R} = \frac{x_m}{\cos\varphi_m}\,, \tag{7}$$

$$d_{1,R} = y_m - x_m \tan\varphi_m\,. \tag{8}$$

Določene referenčne vrednosti služijo kot vhod za enostaven proporcionalno–diferencirni (PD) regulator za posamezen segment.

V drugi fazi prilagajamo hitrost linearnega motorja v_i glede na oddaljenost igle od debla drevesa Δ

$$v_i = \begin{cases} 14\,\mathrm{mm/s}, & \text{če je } \Delta > 2\,\mathrm{mm}; \\ 5\,\mathrm{mm/s}, & \text{če je } \Delta \le 2\,\mathrm{mm}. \end{cases} \tag{9}$$

Z zmanjšanjem hitrosti zagotovimo nadzorovan vbod in manjši stres za deblo.

V tretji fazi z regulacijo hitrosti črpalke zagotovimo ustrezno količino sredstva (na primer, za 1 ml sta potrebna 2,75 obrata motorja) injiciranega pri ustrezno nizkem tlaku ($p < 0{,}2$ MPa). V primeru, da tlak naraste čez nastavljeno vrednost, se črpanje ustavi, dokler tlak ne pade (sredstvo se absorbira v deblo).

Po končanem injiciranju sledi izvlek igle s konstantno hitrostjo $v_i = -14\,\mathrm{mm/s}$.

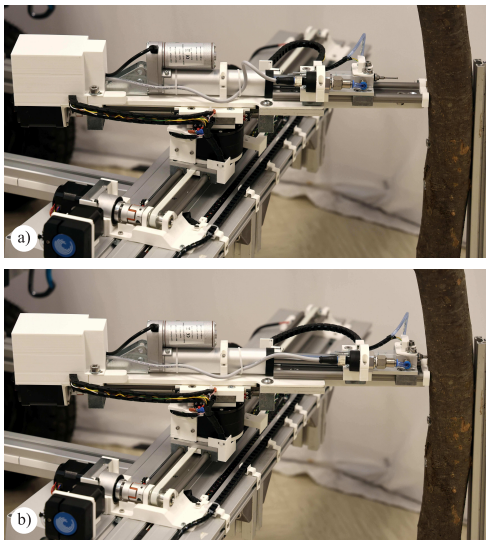
Na sliki 9 je prikazan primer aplikacije v laboratorijskem okolju.

7 Zaključek

Zaradi narave izvedbe endoterapije ima le-ta velik potencial za robotizacijo. Delo je fizično naporno (sila vboda > 600 N), pri ročnem apliciranju pa je težko ustrezno nadzorovati ustrezen tlak, kar lahko privede do večjih poškodb debla. Predstavljen prototip robotskega mehanizma za endoterapijo omogoča detekcijo debla, določitev točke vboda, izvedbo vboda ter injiciranje sredstva pod nadzorovanim tlakom. V kombinaciji z avtonomno mobilno platformo predstavlja ekološko sprejemljivejšo alternativo klasičnemu škropljenju tako iz vidika porabe zaščitnih sredstev, varstva okolja kot tudi zmanjšanja obremenitve kmetov.

Zahvala

Raziskovalno delo so delno financirali Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (številka programa P2-0228), Republika Slovenija in Evropska unija iz Evropskega socialnega sklada plus (ESS+) (projekt "Napredne metode varstva rastlin v trajnih nasadih" v okviru operacije "PUŠ v delovno okolje 2024–2027") ter intervencija IRP38 iz Skupne kmetijske politike 2023–2027 (projekt "Robot4Plants)", št. pogodbe 33126-1/2025/18).



Slika 9: a) Postavitev robotskega mehanizma v vmesno točko; b) vbod igle v deblo

Literatura

[1] M. Salyani and R. Cromwell, "Spray drift from ground and aerial applications," *Transactions of the ASAE*, vol. 35, no. 4, pp. 1113–1120, 1992.

[2] L. Archer, J. H. Crane, and U. Albrecht, "Trunk injection as a tool to deliver plant protection materials—an overview of basic principles and practical considerations," *Horticulturae*, vol. 8, no. 6, p. 552, 2022.

[3] A. Benigno, C. Aglietti, V. Papini, M. Riolo, S. O. Cacciola, and S. Moricca, "Tree endotherapy: A comprehensive review of the benefits and drawbacks of trunk injection treatments in tree care and protection," *Plants*, vol. 14, no. 19, p. 3108, 2025.

[4] K. T. Smith and P. A. Lewis, "Potential concerns for tree response from stem injection," in *In: Proceedings of the third hemlock woolly adelgid conference; 2005 February 1-3; Asheville, NC.*, 2005.

[5] I. Ojo, Y. Ampatzidis, A. d. O. C. Neto, and O. Batuman, "Development of an automated needle-based trunk injection system for HLB-affected citrus trees," *Biosystems Engineering*, vol. 240, pp. 90–99, 2024.

[6] I. Ojo, Y. Ampatzidis, A. d. O. C. Neto, H. Bayabil, J. K. Schueller, and O. Batuman, "Determination of needle penetration force and pump pressure for the development of an automated trunk injection system for HLB-affected citrus trees," *Journal of the ASABE*, vol. 67, no. 4, pp. 835–842, 2024.

[7] I. Ojo, Y. Ampatzidis, A. d. O. C. Neto, H. Guan, and O. Batuman, "Oxytetracycline injection using automated trunk injection compared to manual injection systems for HLB-affected citrus trees," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 226, p. 109430, 2024.

[8] N. Carion, L. Gustafson, Y.-T. Hu, S. Debnath, R. Hu, D. Suris, C. Ryali, K. V. Alwala, H. Khedr, A. Huang, *et al.*, "SAM 3: Segment anything with concepts," *arXiv preprint arXiv:2511.16719*, 2025.