

MIÉRT KELL POLARIZÁCIÓÉRZÉKELÉS A GAZDAÁLLAT-KERESÉSHEZ?

A bögyök – vizuális környezetük sötét foltjai közül – polarizáció segítségével választják ki a napsütötte sötét gazdaállatokat

Szörényi Tamás, Pereszlényi Ádám, Horváth Gábor – ELTE, Biológiai Fizika Tanszék

Barta András – Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Gerics Balázs – Állatorvostudományi Egyetem, Anatómiai és Szövetani Tanszék

Hegedüs Ramón – Eberhard Karls Egyetem, Kognitív Neurotudományok Tanszék, Tübingen, Németország

Susanne Åkesson – Lundi Egyetem, Biológia Tanszék, Lund, Svédország

A vérszívó bögyök polarotaktikus rovarok, vagyis vonzódnak a lineárisan polarizált fényhez [1]. A hím és nőstény bögyök a vízfelszín által visszavert fény vízszintes polarizációja alapján ismerik fel a vizet [2]. E polarotaxisnak legalább hat funkciója van [1]: (i–iii) A hímek és nőstények vizet keresnek (i) iváshoz, (ii) fürdéshez és (iii) vízközeli páráshoz. (iv–v) A nőstények (iv) petéiket a vízinövényekre vagy sárba rakják, továbbá (v) a vízparti növényeken lesben várnak, amíg a vérszívásra alkalmas gazdaállataik a vízhez járulnak inni vagy fürdeni. (vi) A hímek és nőstények gazdaállat-keresését a gazdáról visszavert fény p pola-

rizációfoka által kiváltott polarotaxis, a polarizációiránytól függetlenül segíti: a nőstények a peték fejlődéséhez szükséges vérszívás miatt keresik a gazdaállatokat, míg a hímek az odavonzott nőstényekkel való párázás céljából. E hat funkció okán a hím és nőstény bögyök az evolúció során erősen polarotaktikus rovarokká fejlődtek.

Számos vérszívó rovarfajnak a petéik érleléséhez gerincesek vérére van szüksége. Az úgynevezett nem-autogén nőstények számára a vérszívás létfontosságú, míg az autogének vér nélkül is képesek petéket rakni, de vérszívásuk növeli termékenységüket és a lerakható peték számát [3]. A termékenység tovább nőhet, ha a vér változó testhőmérsékletű („hidegvérű”) állatok helyett állandó testhőmérsékletűekből („melegvérűekből”) származik [4]. A peterakáshoz szükséges vérmennyiség begyűjtéséhez a nősténynek rendszerint több gazdaállatot is föl kell keresnie, ezért a hatékonyabb gazdaállat-felismerés előnyös [5]. E vérszívó rovarok, köztük a bögyök halálos betegségek kórokozóit terjeszthetik gazdaállataik között, beleértve az embert is [5, 6].

Az írás alapjául szolgáló kutatásunkat a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K-123930 számú, „A zebracsíkok termofiziológiai vizsgálata: új magyarázat a zebracsíkok szerepére” című pályázata támogatja.

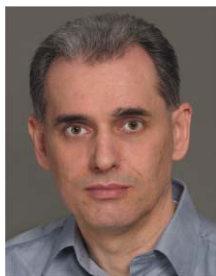
Szörényi Tamás az ELTE-n szerzett MSc biofizikus diplomát 2017-ben. Diplomamunkáját az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában írta Horváth Gábor vezetésével. Korábban ugyanezen tanszék drónos kutatócsoportjában programozott. A XXXII. OTDK-n *Csoportosan repülő robotok – alakzatrepülés* című munkájával 3. helyezést ért el. Jelenleg egy külföldi cégnél biofizikus kutató.



Pereszlényi Ádám az ELTE-n végzett biológus, jelenleg doktorandusz az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. Emellett a Magyar Természettudományi Múzeum Madárgyűjteményében segédmuzeológus. A biológiai és biofizikai kutatások mellett állatpreparálással is foglalkozik.



Barta András az ELTE-n végzett fizikusként, majd ugyanott szerzett PhD-fokozatot biofizikából a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. A bio- és környezetoptikával kapcsolatos alap kutatásokon kívül ipari műszerek, elsősorban minőségellenőrző eszközök fejlesztésével foglalkozik az Estrato Kutató és Fejlesztő Kft. vezetőjeként. Számos kutatásfejlesztési pályázat előkészítésében és megvalósításában vett és vesz részt.



Horváth Gábor fizikus, az MTA doktora, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumának vezetője. A vizuális környezet optikai sajátosságait és az állatok látását tanulmányozza, továbbá biomechanikai kutatásokat folytat. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa. Évtizedek óta aktív tudományos ismeretterjesztői munkát is folytat előadások és cikkek formájában.



Gerics Balázs állatorvosi diplomáját Berlinben, a Humboldt Egyetemen szerezte 1988-ban. Azóta Budapesten oktatja házi emlősök funkcionális és alkalmazott anatómiáját. Korábban az idegrendszer funkcionális morfológiai változásait kutatta rágcsálókön. Az utóbbi években érdeklődése a lovak felé fordult, elsődlegesen azok patkolásához kapcsolódó témákkal foglalkozik.

Vérszíváshoz a nőstény bögölyöknek fel kell ismerniük és a vizuális környezetétől el kell különböztetniük a gazdaállatokat. Számos vérszívó rovarfaj használ optikai jeleket a repülés irányításához és a gazdaállat-kereséshez [5], sokuk a visszaverődő fény lineáris polarizációját is [7]. A gazdaállat-kereső nőstény bögölyök aktívabbak nyitott, napsütötte területeken, mint erdős, árnyékos helyeken, ezen felül sok bögölyfaj aktivitása délben – amikor a napfény a legintenzívebb – a legnagyobb [8, 9]. A nőstény bögölyök a napsütötte, sötét gazdaállatokat kedvelik, különösen a feketéket [10], és vizuális gazdaállat-keresésüket részben a gazda kultakarójáról visszavert fény polarizációfoka szabályozza [7]. Minél sötétebb a gazdaállat és minél nagyobb a róla visszavert fény polarizációfoka, annál vonzóbb célpont a nőstény bögölyök számára [1].

Bögölyökben, mint minden vízhez kötődő rovarban a vízkeresést a vízszintes polarizáció szabályozza, mivel a vízfelszín rendszerint vízszintesen polarizált fényt tükröz [11]. A gazdaállat-keresésben a polarizációirány helyett inkább a polarizációfok játszik fontos szerepet [7]. Az utóbbi jelenség oka, hogy egy gazdaállat testfelszíne bármilyen irányban (vízszintesen, ferdén, függőlegesen) polarizált fényt verhet vissza [12], ellentétben a vízfelülettel.

A bögölyök e kettős polarotaxisát használják ki a polarizációs bögölycsapdák [13]: a vizet kereső hím és nőstény bögölyöket fényes (sima) fekete vízszintes felületről (ragacos tábláról, olajfelszínről, nap-
elemtábláról) tükröződő vízszintesen poláros fény vonzza a csapdákhöz, amelyek vízszintesen polarizáló vízfelszín utánóznak [10, 14]. A gazdaállat-kereső nőstényeket a talaj fölött felfüggesztett, függőleges sík vagy gömb alakú fényes (sima) fekete célpontok csalogatják, amelyek sötét és erősen poláros gazdaállatokat utánóznak [7, 10]. A bögölyök – mint általában a polarotaktikus vízirovarok – csak gyen-

gén vonzódnak matt (érdes) fekete vagy más matt sötét színű felületekhez [2, 7]. Ezért a leghatékonyabb bögölycsapdáknak használatos csalik feketék és simák (fényesek) [13]. A sima felszín azért fontos, mert csak az ilyen képes nagy polarizációfokú fényt visszaverni a

$$\theta_{\text{Brewster}} = \arctan(n)$$

Brewster-szög közeléből, amit a tükröző felület normálvektorától mérünk és n a tükröző anyag törésmutatója.

Habár a nőstény bögölyök a napsütötte, sötét és erősen poláros gazdaállatokat, valamint a fényes fekete célpontokat részesítik előnyben a matt s így csak gyengén polárosakkal szemben [7], ennek biológiai, ökológiai okai egyelőre ismeretlenek. E viselkedés okául egy új termofiziológiai magyarázatot tételünk fel, aminek kísérleti ellenőrzése jelenleg is folyik (NKFIH K-123930). Annak megindoklására pedig, hogy miért szükséges polarizációérzékelés a sötét gazdaállat megtalálásához, a következő hipotézist állítottuk fel: mikor egy nőstény bögöly sötét gazdaállatot keres, kiválasztja a környezetében levő sötét foltokat, mint vérszívásra alkalmas lehetséges célpontokat. Azonban a vizuális környezetben számos olyan sötét folt is akadhat, amelyek nem a kívánt célpontok (sötét gazdaállatok), hanem a növényzet (bokrok, fák) sötét foltjai. Mivel a fák és bokrok levelei nem mind azonos irányban állnak, ezért a róluk visszavert fény polarizációiránya széles szögtartományban szór. Ennek optikai következménye, hogy a bögölyök összetett szemének ommatídiumaiban (elemi szemecskéiben) e növényi sötét foltok átlagos polarizációfoka kicsi. Ezzel ellentétben a sötét gazdaállatok rendszerint sima (fényes) testfelülete a fényt nagy polarizációfokkal veri vissza, és a polarizációirány helyileg csak kissé szór. Tehát a háttérnövényzet sötét részei és a napsütötte sötét gazdaállatok a róluk visszavert fény polarizációfokában szignifikánsan különbözhetnek. A bögölyök érzékeli a fénypolarizációt, így képesek megkülönböztetni egy sötét és kevésbé poláros (árnyékos növényzeti) foltot egy napsütötte, sötét és erősen poláros folttól (gazdaállattól).

Kutatásunk során e hipotézist teszteltük [15]. Képalakító polarimetriát használva – változatos megvilágítási körülmények és különböző háttérnövényzet mellett – egy sötét gazdaállatmodellről és egy élő fekete tehénről visszavert fény polarizációs mintázatait mértük.

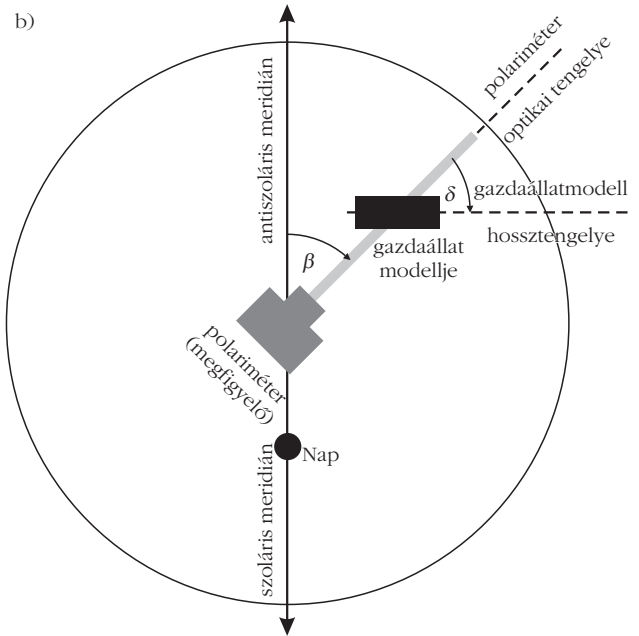
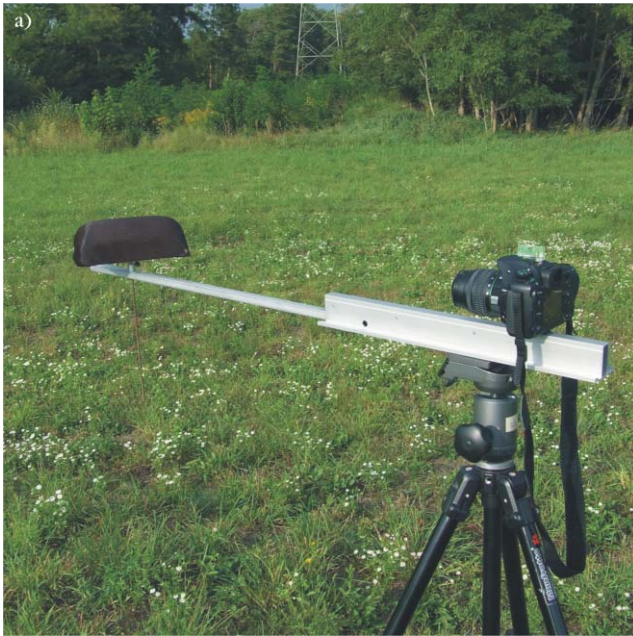
Összehasonlítottuk a növényzet sötét foltjairól és a sötét gazdaállatmodellről/tehénről eredő fény intenzitását és polarizációfokát. Meghatároztuk a sikeres gazdaállat-felismerés esélyét külön a célpont intenzitása és polarizációfoka, valamint e kettő kombinációja alapján is. Megmutattuk, hogy a polarizációfok felhasználása jelentősen növeli a napsütötte, sötét gazdaállatok vizuális detekciójának hatékonyságát növényzettel borított – ami a természetes optikai környezetre jellemző – háttér előtt [15].



Hegedüs Ramón biofizikus az ELTE-n diplomázott (2005), majd 2008-ban ugyanitt doktorált a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. Az Oktatási Minisztérium Ifjúsági Bolyai-díjasa, és I. díjat kapott a Magyar Biofizikai Társaság Ernst Jenő Alapítványától. Kutatott a spanyol Gironai Egyetemen, majd Humboldt-ösztöndíjjal a német Tübingeni Egyetemen. Az alap kutatás mellett főbb kutatás-fejlesztési érdeklődési területei: látás, számítógépes képfeldolgozás, fotográfia, gépi látás.



Susanne Åkesson a svéd Lundi Egyetem Biológia Tanszékének biológus-ökológus professzora és a Lundi Centre for Animal Movement Research igazgatója. Nemzetközi tudományos expedíciók szervezője-résztevője, amelyeken főleg a madarak orientációját vizsgálja. Az állatok (különösen a rovarok és madarak) navigációjának, mozgásának és ökológiájának neves kutatója. Számos szakkikk és több szakkönyv szerzője. Rangos szakmai kitüntetések – többek között a fizikai Ig Nobel-díj – birtokosa.



1. ábra. a) A lómodellrel végzett képalkotó polarimetriás mérés eszköze. A félhenger alakú, sötétbarna lóbbőrrel bevont lómodellt a polariméter előtt rögzítettük a modell függőleges tengelye körül forgathatóan. b) A mérési elrendezés geometriája felülnézetből. β : a polariméter vízszintes optikai tengelyének az antiszoláris meridiánnal bezárt szöge. δ : a modell vízszintes hossz tengelyének a polariméter optikai tengelyével bezárt szöge.

Eszközök és módszerek

Képalkotó polarimetria

Képalkotó polarimetriával a terepen mértük egy gazdaállatmodellről visszavert fény polarizációs mintázatait különböző növényhátter előtt a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában (1.a ábra). A méréseket 2016 júliusában egy Göd (47° 43' É, 19° 09' K) közelében levő lovasfarmon végeztük napos időben, felhőtlen ég alatt. A gazdaállatmodell (a továbbiakban lómodell) egy 10 cm átmérőjű, 22 cm hosszúságú félhenger volt, amit sötétbarna lóbbőrrel vontunk be (1.a ábra), amin a szőrszálak a lovak hátára és oldalára jellemzően irányultak. E lómodell jól utánozta a gazdaállatok közel hengeres testének felső részét. A lómodellt a polariméter előtt 1 m távolságra rögzítettük (1.a ábra). A polariméter vízszintes optikai tengelyének az antiszoláris meridiánnal bezárt β szögét és a lómodell ugyancsak vízszintes hossz tengelyének a polariméter optikai tengelyével bezárt δ szögét tesztes szerint változtathattuk (1.b ábra). E lómodellel több mérést végeztünk különböző fák és bokrok álló növényzettel a háttérben (1.a ábra). A vizsgált esetek megvilágítási jellemzőit és irányszögeit az 1. táblázat tartalmazza.

Ugyancsak képalkotó polarimetriával mértük egy fekete tehen polarizációs mintázatait 2008 szeptemberében a dél-svédországi Lund közelében levő Stensoffa Ecological Field Station (55° 42' É, 13° 25' K) mellett. A részlegesen felhős ég miatt a tehen egyszer napsütötte, máskor árnyékos volt (amikor a Napot felhő takarta).

Gazdaállat-felismerő algoritmusok

Egy adott gazdaállat (lómodell, fekete tehen) és háttérnövényzet esetén a visszavert fény vörös, zöld és kék tartományokban mért i relatívintenzitás- és p polarizációs-fok-mintázatait felhasználva, az általunk fejlesztett

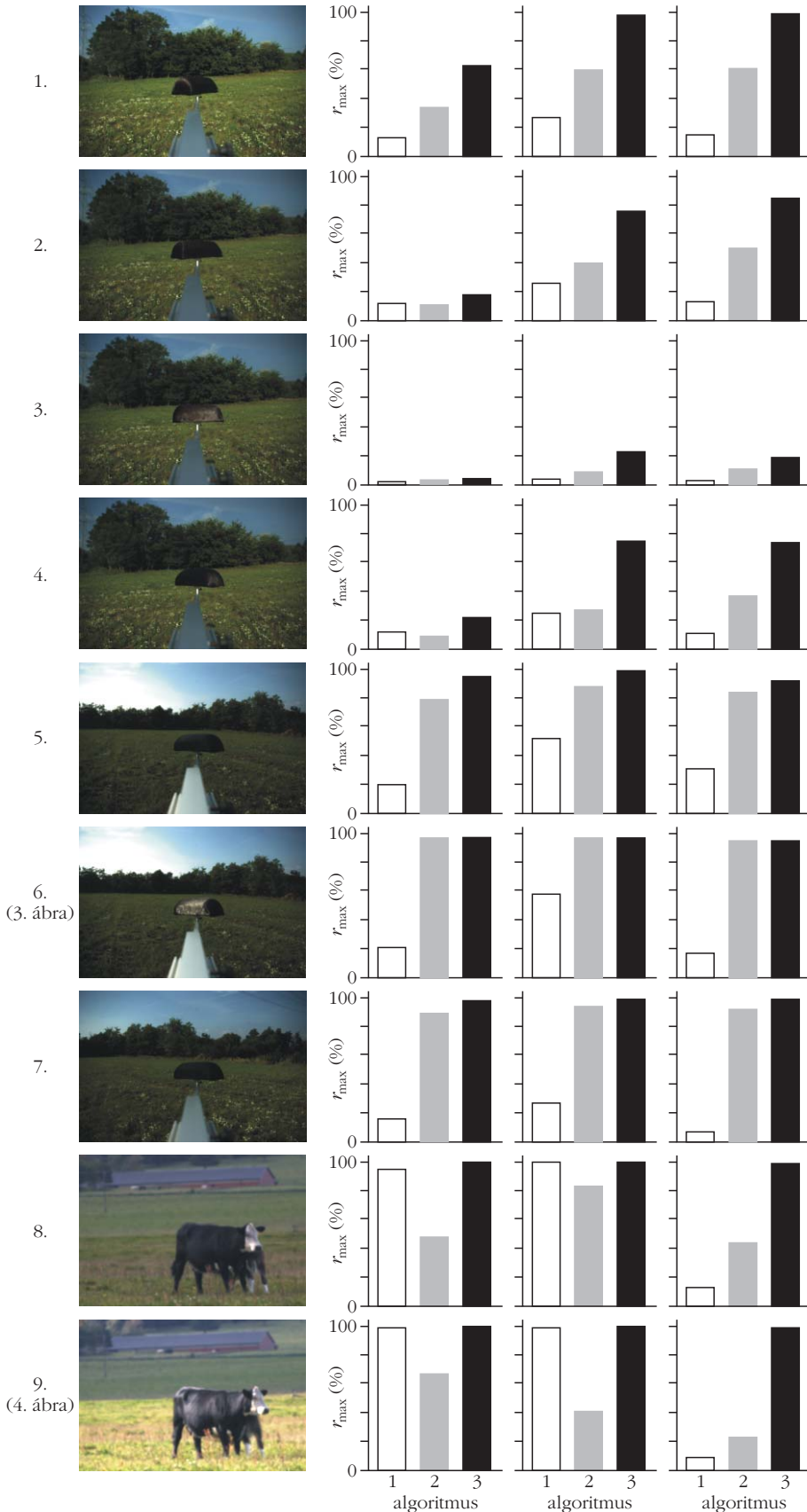
1. táblázat

A terepi mérésben vizsgált 9 különböző eset megvilágításának jellemzői, valamint a polariméter (megfigyelő) és a lómodell vagy gazdaállat (fekete tehen) óramutató járásával megegyezően mért β és δ irányszögei (1.b ábra)

eset	megvilágítás jellemzői	β	δ
1.	Nap a polariméter mögött, napsütötte lómodell	0°	+30°
2.	Nap a polariméter mögött, napsütötte lómodell	0°	+60°
3.	Nap a polariméter mögött, napsütötte lómodell	0°	+90°
4.	Nap a polariméter mögött, napsütötte lómodell	0°	-45°
5.	Nap a bal oldalon, árnyékos lómodell	-90°	-45°
6. (3. ábra)	Nap a bal oldalon, napsütötte lómodell	-90°	-45°
7.	Nap a bal oldalon, napsütötte lómodell	-45°	-45°
8.	felhő által takart Nap a bal oldalon, árnyékos fekete tehen	-90°	-45°
9. (4. ábra)	Nap a bal oldalon, napsütötte fekete tehen	-90°	-45°

β : a polariméter vízszintes optikai tengelyének az antiszoláris meridiánnal bezárt szöge. δ : a lómodell vagy fekete tehen vízszintes hossz tengelyének a polariméter optikai tengelyével bezárt szöge.

színhely megvilágítási jellemzők



2. ábra. A lómodell vagy fekete tehén 1., 2. és 3. gazdaállat-felismerő algoritmusmal számított r (%) felismerési sikerének maximuma a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában a terepen vizsgált 9 különböző esetben.

számítógépes program először felismerte azon képpontokat, amelyek kellően sötétek és polárosak, tehát amelyekre a következő két feltétel teljesült: (1) $0\% \leq i \leq i^*$ és (2) $p^* \leq p \leq 100\%$ a vörös, zöld és kék spektrális tartományban, ahol $i = 100I/I_{\max}$ ($I_{\max} = 255$ az I fényintenzitás által felvehető legnagyobb érték) és i^* és p^* küszöbértékek. Az így felismert $N_{\text{felismert}}$ számú képpont a gazdaállathoz vagy a háttérhez tartozhat. Egy röptében gazdaállatot kereső polarizációérzékeny bögöly számára fontos, hogy ezen $N_{\text{felismert}}$ felismert pont döntő többségben a gazdaállathoz tartozzon. A program megszámlálta azon képpontok N számát az $N_{\text{felismert}}$ közül, amelyek a gazdaállatra estek. Az $r = N/N_{\text{felismert}}$ hányados adja a gazdaállat-felismerési sikert. Végül megkaptuk az $r(i^*, p^*)$ felismerési sikert az i^* relatívintenzitás-küszöb és a p^* polarizációfok-küszöb függvényében. A következő három gazdaállat-felismerő algoritmust használtuk:

1. algoritmus

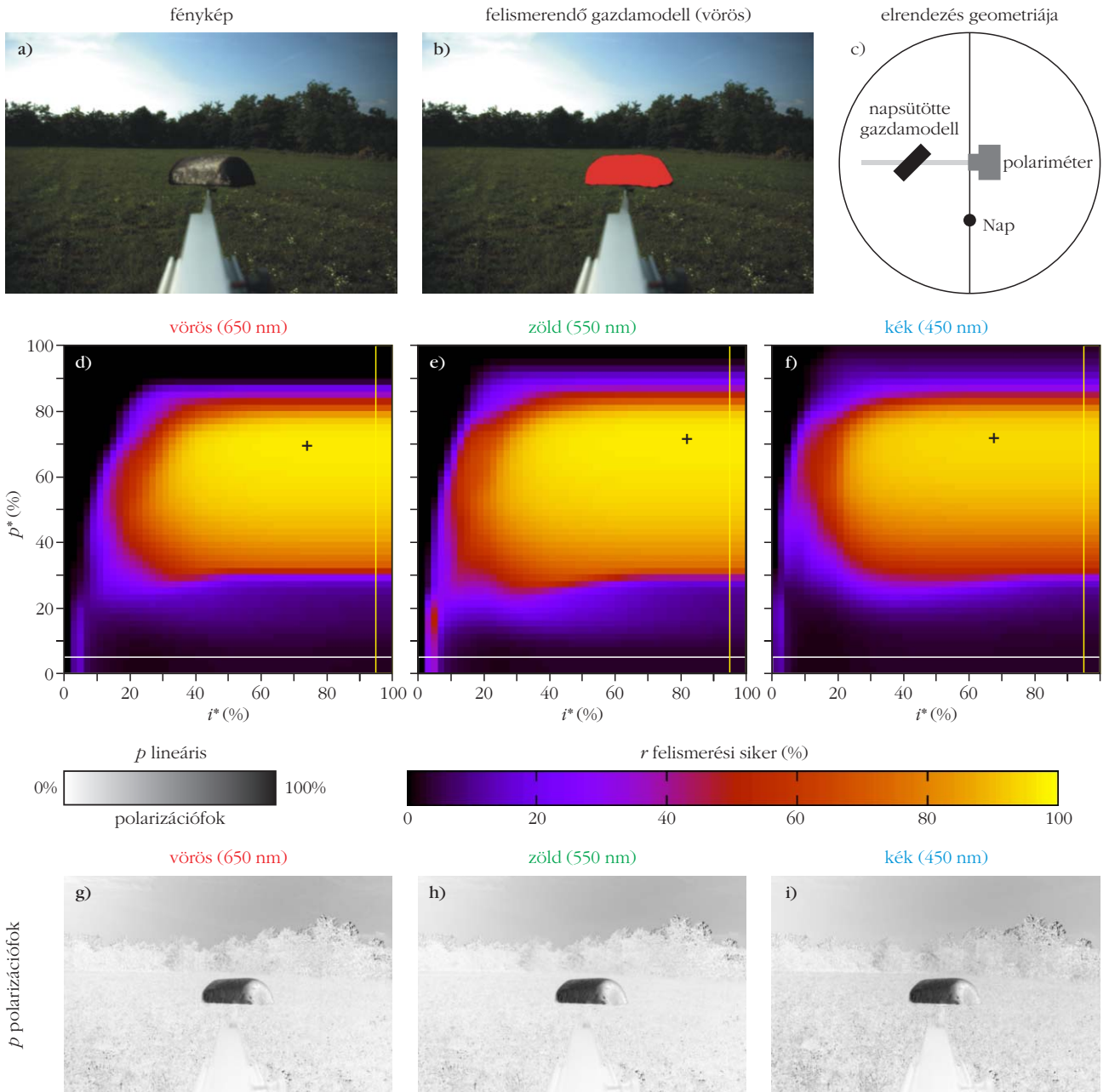
A gazdaállatot kizárólag az i relatív intenzitása alapján ismeri fel a p polarizációfok figyelembe vétele nélkül. Az ezen algoritmussal kapott eredmények az $r(i^*, d^*)$ mátrix $r(0\% \leq i^* \leq 100\%, p^* = 0\%)$ legelső sorában találhatók.

2. algoritmus

A gazdaállatot kizárólag a p polarizációfoka alapján ismeri fel az i relatív intenzitás nélkül. Az ezen algoritmussal kapott eredmények az $r(i^*, d^*)$ mátrix $r(i^* = 100\%, 0\% \leq p^* \leq 100\%)$ jobb szélső oszlopába esnek.

3. algoritmus

A gazdaállatot az i relatív intenzitása és p polarizációfoka alapján ismeri fel. Az így kapott eredmények lefedik a teljes $r(i^*, d^*)$ mátrixot, vagyis az $r(0\% \leq i^* \leq 100\%, 0\% \leq p^* \leq 100\%)$ tartományt.



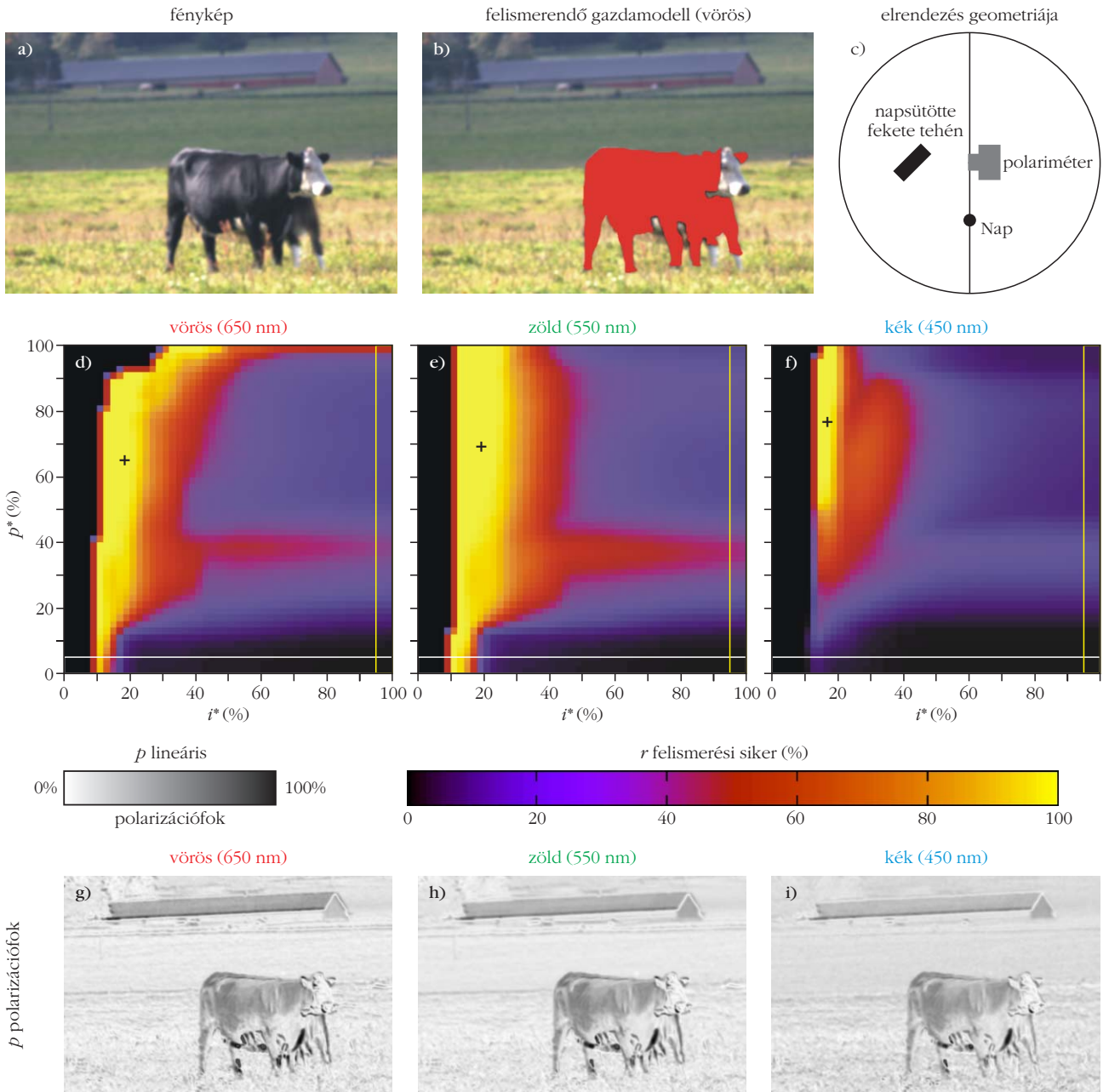
3. ábra. 6. eset. a) A napsütötte sötétbarna lómodell fényképe egy réttel és fákkal a háttérben. b) E képen a vörössel jelzett lómodell mutatja az algoritmusaink (bögölyök) által felismerendő célterületet. c) A mérési elrendezés geometriája. d), e), f) Az r gazdaállat-felismerési siker szinkódolt értékei a p^* (p küszöbértéke) és i^* (az $i = I/I_{\max}$ relatív intenzitás küszöbértéke, ahol $I_{\max} = 255$) függvényében a spektrum vörös, zöld és kék tartományában. r maximumának helyét + mutatja. A fehér kerületű vízszintes téglalap a $p^* = 0\%$ és $0\% \leq i^* \leq 100\%$ értékekhez tartozik, amikor a gazdaállat-felismerésben a fénypolarizáció nem, csak az intenzitás játszik szerepet. A sárga kerületű függőleges téglalap az $i^* = 100\%$ és $0\% \leq p^* \leq 100\%$ értékekhez tartozik, amikor a gazdaállat-felismerésben a fényintenzitás nem, csak a polarizáció játszik szerepet. g), h), i) A p lineáris polarizációfok mintázata a vörös, zöld és kék spektrális tartományokban.

Az 1. és 2. gazdaállat-felismerő algoritmusok a 3. algoritmus speciális esetei, melyek az $r(i^*, d^*)$ mátrix legelső sorának, illetve jobb szélső oszlopának felelnek meg.

Eredmények

Itt most részleteiben csak a 6. esetet (3. ábra) tárgyaljuk, mivel az 1.–5., 7.–9. esetekben méréseinkből és számításainkból a barna lómodellre és fekete tehénre

ugyanazon következtetésekre jutottunk. A 3.a ábra a 6. esetben a lómodellről, valamint háttérben egy mezőről és fákról készült fénykép, amikor a Nap a polariméter mögött volt (3.c ábra). A gazdakereső bögölyök által felismerendő célterületet a 3.b ábra pirosra színezett lómodellje jelzi. A 3.g–i ábrák szerint a zöld növényzet a kékben a legpolarizosabb (legmagasabb p polarizációfokkal veri vissza a fényt) és zöldben a legkevésbé poláros (legkisebb p). A barna lómodell szintén a kékben a legpolarizálóbb, míg vörösben a legkevésbé polarizálja a fényt.



4. ábra. Ugyanaz mint a 3. ábra, de most a 9. eset napsütötte fekete tehenére a c) ábra elrendezésére és az 1. táblázatbeli megvilágítási körülményekre.

A 3.d-f ábrák a 6. eset színekódolt $r(i^*, d^*)$ mátrixát mutatják a vörös, zöld és kék spektrális tartományokban. Adott i^* relatívintenzitás-küszöb mellett az r gazdaállat-felismerési siker erősen függ a p^* polarizációfok-küszöbtől és meredek maximumot mutat, amint p^* változik. Más részről, adott p^* mellett r kevésbé függ i^* -től, azaz r közel állandó i^* széles intervallumban. A 3.d-f ábrákon + jelöli az $r(i^*, d^*)$ maximumát, aminek értéke és (i^*, d^*) térbeli helye hullámhosszfüggő (2. ábra). Tehát a maximális r -hez tartozó d^* csökkenő hullámhossz mellett nő.

Ha a bögölyök a sötét gazdaállatokat az 1. algoritlussal (csak az i relatív intenzitás alapján) keresnek, akkor felismerési sikereik a 3.d-f ábrák $r(i^*, d^*)$ mátrixának a $d^* = 0\%$ -hoz tartozó, fehér keretű legalsó

sorába esnének. Ha a bögölyök a gazdaállatokat a 2. algoritlussal (csak a p polarizációfok alapján) keresnek, akkor felismerési sikereik a 3.d-f ábrák $r(i^*, d^*)$ mátrixának $i^* = 100\%$ -hoz tartozó, sárga keretű jobb szélső oszlopába esnének. Ha a gazdaállat-keresés a 3. algoritlussal történik (i és p alapján), akkor r maximumát + jelöli a 3.d-f ábrákon. A 2. ábra szerint mind a 9 vizsgált esetben a 3. algoritlussal a vörösben, zöldben és kékben kapott r_{\max} mindig nagyobb, mint az 1. és 2. algoritlussal kapottak.

A spektrum egy adott tartományában a napsütötte lómodell nagyobb polarizációfokú fényt ver vissza, mint az árnyékos (3.g-i ábrák). Ennek az a fontos következménye, hogy az r gazdaállat-felismerési siker nagyobb a napos, mint az árnyékos lómodell esetén:

a 2. ábrából egyértelműen látszik, hogy adott spektrális tartományban a 3. algoritmussal kapott r_{\max} nagyobb, ha a lómodell napos. Tehát a polarizációt érzékelő bögölyök könnyebben ismerik fel a napsütötte gazdaállatokat, mint az árnyékosakat.

A fenti megállapításokat megerősítik az árnyékos és napos fekete tehenre kapott hasonló eredmények (2. és 4. ábrák): (i) Bármely spektrális tartományban a 3. algoritmussal kapott r_{\max} e fekete tehen esetén mindig nagyobb, mint az 1. vagy 2. algoritmussal kapott r_{\max} (2. ábra). (ii) A spektrum adott tartományában az árnyékos tehen kevésbé polarizált fényt vert vissza, mint a napsütötte (4.g-i ábrák).

Mindebből arra következtetünk, hogy a p polarizációfok segít a bögölyöknek elkülöníteni a sötét gazdaállatokat a vizuális környezetük egyéb sötét foltjaitól. Tehát gazdaállat-kereséskor sikeresebbek, ha használják polarizációérzékelésüket.

Elemzés

Megmutattuk, hogy a polarizáció érzékelése előnyös a sötét gazdaállatok felismeréséhez: a p polarizációfok segítségével a bögölyök meg tudják különböztetni a sötét gazdaállatokat a környező növényzet sötét foltjaitól, mert az előbbieket nagyobb polarizációfokú fényt vernek vissza, mint az utóbbiak.

A bögölyök egészséges gazdaállatai (például lovak, marhák, egyéb patások) általában fényes, sima kültakaróval rendelkeznek, közel párhuzamosan álló szomszédos szőrszálakkal. Kivételt képeznek azon esetek, mikor például télen (amikor a bögölyök nem aktív) a jobb hőszigetelés érdekében a szőrszálak hosszabbak és rendezetlenebbek, ami egy durva, matt megjelenésű felszín eredményez. A fényes, sima kültakaró nagyobb p polarizációfokú fényt vernek vissza, mint a mattok, mert a durva felületek depolarizálják a visszavert fényt: minél durvább a felület, annál erősebb a depolarizáló (p -csökkentő) hatás. Az Umow-szabály [16] szerint egy adott hullámhossztartományban minél sötétebb egy felület, annál nagyobb a róla visszavert fény p polarizációfoka. Tehát a visszavert fényt a fekete gazdaállatok polarizálják legerősebben. Adott fényvisszaverő felület polarizálóképessége a Brewster-szögben maximális. Ebből következik, hogy a polarizációérzékeny repülő bögölyök akkor érzékelnek magas polarizációfokot, amikor a sötét gazdaállat testfelületének azon részeit figyelik, ahonnan a fény a Brewster-szög közelében verődik vissza.

Napsütésben a tükröző irányból visszavert fény a legerősebb: ilyenkor a napfény beesési és visszaverési szögei egyenlők. Minden más irányból csak az ég sokkal gyengébb fénye verődik vissza. Ha a tükröző irányszög közel esik a Brewster-szöghöz, akkor a sötét felszínről visszavert fény nagyon magas polarizációfokú. Ha a gazdaállat árnyékban van, akkor testfelszínének egy adott pontjára minden lehetséges irányból (égbolt, növényzet, talaj) érkezik fény, ami-

nek következménye a visszavert fény viszonylag alacsony polarizációfoka. Ezek a fizikai okai annak, hogy a napsütötte gazdaállatok nagyobb polarizációfokú fényt vernek vissza, mint az árnyékban levők.

A sötét szőrű gazdaállatokról visszavert erősen poláros fényvel ellentétben, a növényzet egy árnyékos részéről egy repülő bögöly ommatídiumaiba jutó fény viszonylag alacsony polarizációfokú. Ugyanis egy véletlenszerűen irányuló levél minden lehetséges irányból kap fényt a környezetéből (égboltról és a többi levélről). Ez azzal jár, hogy nincs tükröző visszaverődés, vagyis nem létezik olyan kitüntetett irány, ahonnan a levél kiemelkedően sok fényt verne vissza. E diffúz reflexió miatt a növényzet sötét részeinek árnyékos leveleiről visszavert fény véletlenszerű irányokban és viszonylag gyengén polarizált (alacsony p). A bögölyök egy ommatídiuma a ráeső fény polarizációját átlagolja. Ezért, ha a látóteréből jövő fény polarizációiránya nem állandó, akkor az átlagolt p tovább csökken, különösen távoli tárgyak esetén. Tehát a növényzet sötét, árnyékos foltjait sokkal gyengébben polárosnak érzékeli a bögölysem, mint a napsütötte gazdaállatokról Brewster-szögben visszaverődő fényt.

Elsőre azt gondolhatnánk, hogy a bögölyök úgy tudnák legkönnyebben felismerni a gazdaállatokat, ha kizárólag a fényintenzitásra támaszkodva egyszerűen a sötét foltokat keresnék. E stratégiával (1. algoritmus) azonban gyakran a háttérnövényzet sötét foltjait is gazdaállatnak vélnék, így ez nem elég hatékony módszer. Alternatívaként a bögölyök célpontjaikat kiválaszthatnák pusztán a polarizációfok alapján is, erősen polarizáló tárgyakat keresve. E stratégiával (2. algoritmus) az a probléma, hogy csak azon gazdaállatokat tudnák így detektálni, amelyek teste megfelelő irányú és így kellően polarizáló. Ha emiatt alacsony lenne a gazdaállat-felismeréshez szükséges p^* polarizációfok-küszöb, akkor viszont előfordulhatna, hogy a növényzet jelentős részét is tévesen gazdaállatként detektálnák. Tehát önmagában az 1. és 2. algoritmus egyike sem ideális megoldás. Eredményeink szerint a gazdaállatok megtalálásához a bögölyök számára a kellően sötét és megfelelően poláros célpontok keresése (3. algoritmus) a jó stratégia, mert így nagyon jó eséllyel tudják megkülönböztetni őket a növényzet sötét foltjaitól.

Kutatásunkkal a fénypolarizáció-érzékelésnek a bögölyök vizuális gazdaállat-keresésében betöltött előnyét szemléltettük. Hangsúlyozni szeretnénk, hogy a gazdaállat-keresésben más tényezők is fontos szerepet játszhatnak: például a bögölyök vonzódnak a mozgó csalikhoz [5], vagyis gazdaállataikat is részben a mozgásuk alapján azonosítják. Ezen felül a bögölyök erőteljesen vonzódnak a gazdaállatok szagához [5]. Azonban kiderült, hogy többek között a sötét-világos csíkok megzavarják a bögölyök szag utáni vonzódását, vagyis a gazdaállatok színmintázata domináns a specifikus szagaikkal (például ammónia, szén-dioxid) szemben [17] a gazdaállat-kereső bögölyök érzékszervében.

Irodalom

1. Horváth G., Egri Á., Blahó M.: Chapter 22. Linearly polarized light as a guiding cue for water detection and host finding in tabanid flies. In: G. Horváth (editor): *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York (2014) 525–559.
2. Horváth G., Majer J., Horváth L., Szivák I., Kriska G.: Ventral polarization vision in tabanids: horseflies and deerflies (Diptera: Tabanidae) are attracted to horizontally polarized light. *Naturwissenschaften* 95 (2008) 1093–1100.
3. Ballard J. W. O., Waage J. K.: Feeding strategies of the horseflies *Hybomitra expollicata* and *Tabanus bromius* in southern France. *Medical and Veterinary Entomology* 2 (1988) 265–270.
4. Jalil M.: Observations on the fecundity of *Aedes triseriatus* (Diptera: Culicidae). *Entomologia Experimentalis et Applicata* 17 (1974) 223–233.
5. Lehane M. J.: *The Biology of Blood-sucking in Insects*. Cambridge University Press, Cambridge, UK (2005)
6. Marcantonio M., Pascoe E. L., Baldacchino F.: Sometimes scientists get the flu. Wrong...! *Trends in Parasitology* 33 (2017) 7–9.
7. Egri Á., Blahó M., Sándor A., Kriska G., Gyurkovszky M., Farkas R., Horváth G.: New kind of polarotaxis governed by degree of polarization: attraction of tabanid flies to differently polarizing host animals and water surfaces. *Naturwissenschaften* 99 (2012) 407–416.
8. Baldacchino F., Desquesnes M., Mihok S., Foil L. D., Duvallet G., Jittapalapong S.: Tabanids: neglected subjects of research, but important vectors of disease agents! *Infection, Genetics and Evolution* 28 (2014) 596–615.
9. Herczeg T., Blahó M., Száz D., Kriska G., Gyurkovszky M., Farkas R., Horváth G.: Seasonality and daily activity of male and female tabanid flies monitored in a Hungarian hill-country pasture by new polarization traps and traditional canopy traps. *Parasitology Research* 113 (2014) 4251–4260.
10. Egri Á., Blahó M., Száz D., Barta A., Kriska G., Antoni G., Horváth G.: A new tabanid trap applying a modified concept of the old flypaper: Linearly polarising sticky black surfaces as an effective tool to catch polarotactic horseflies. *International Journal for Parasitology* 43 (2013) 555–563.
11. Horváth G.: Chapter 16. Polarization patterns of freshwater bodies with biological implications. In: G. Horváth (editor): *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York (2014) 333–344.
12. Egri Á., Blahó M., Kriska G., Farkas R., Gyurkovszky M., Ákesson S., Horváth G.: Polarotactic tabanids find striped patterns with brightness and/or polarization modulation least attractive: an advantage of zebra stripes. *Journal of Experimental Biology* 215 (2012) 736–745.
13. Horváth G., Blahó M., Egri Á., Lerner A.: Chapter 23. Applying polarization-based traps to insect control. In: G. Horváth (editor): *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York (2014) 561–584.
14. Blahó M., Egri Á., Barta A., Antoni G., Kriska G., Horváth G.: How can horseflies be captured by solar panels? A new concept of tabanid traps using light polarization and electricity produced by photovoltaics. *Veterinary Parasitology* 189 (2012) 353–365.
15. Horváth G., Szörényi T., Pereszlényi Á., Gerics B., Hegedüs R., Barta A., Ákesson S.: Why do horseflies need polarization vision for host detection? Polarization helps tabanid flies to select sunlit dark host animals from the dark patches of the visual environment. *Royal Society Open Science* 4 (2017) 170735.
16. Umow N.: Chromatische Depolarisation durch Lichtzerstreuung. *Physikalische Zeitschrift* 6 (1905) 674–676.
17. Blahó M., Egri Á., Száz D., Kriska G., Ákesson S., Horváth G.: Stripes disrupt odour attractiveness to biting horseflies: Battle between ammonia, CO₂, and colour pattern for dominance in the sensory systems of host-seeking tabanids. *Physiology and Behavior* 119 (2013) 168–174.