

Szenzorhálózatok 3D összefűzése

Kiss Attila és Szirányi Tamás

Elosztott Események Elemzése Kutatólaboratórium, MTA SZTAKI
{kiss.attila,sziranyi}@sztaki.mta.hu

Kivonat Jelen munkában arra keresünk gráfelméleti megoldásokat, hogy a tetszőlegesen elhelyezkedő robot-szenzorok lokálisan metrikus adatai alapján az egymástól függetlenül mozgó robotok terét összefüggő metrikává alakíthassuk. A képtérben jellemző pontokat kiválasztva megke-reshetjük a különböző robot-ágensekhez tartozó átfedő területek pont-jait. A lokális metrikán alapulva a jellemző pontok összességével feszítsük ki a teret: egy tetszőleges viszonyítási ponthoz képest adjuk meg a jellemző pontok geometriai helyzetét. Erre a problémára a gráfelméletből ismert realizációs és lokalizációs feladatok jó elméleti hátteret adnak. A feladatok ismertetése után a nekik megfelelő gráf alapú optimalizáló eljárásokat ismertetünk, megvizsgálva több lehetséges feladat-specifikációt például horgonypontok használatát a megoldásnál vagy azok használata nélkül.

1. Bevezető

Az érzékelők körbe vesznek minket; szinte minden eszközünkben vannak szenzorok, amiknek egyre nagyobb része el is érhető valamilyen hálózaton keresztül. Itt most a kérdés az, hogy ez a lefedettség milyen mértékű, illetve hogyan optimalizálható. A szenzorok, illetve az azokat hordozó szenzor ágensek hálózata esetén a szerveződés 3D-be illesztése kétféle módon érthető:

1. A szenzorok egymás közti távolsága alapján lefedettséget számítunk (*szenzor-tér*);
2. A szenzorok által leképezett környezet jellemzőit fűzzük össze (*adat-tér*).

Mindkét esetet lehet optimalizálni, de két különböző értelmezéssel:

1. A szenzorok által leképezett terület a lefedendő területhez képest ("Recall" jellegű), illetve a szenzor-hálózat összekötöttsége (vagy feldaraboltsága);
2. A szenzorok által leképezett területekből felépíthető térbeli modell pontosságát ("Precision" jellegű).

A szenzor-hálózat összekötöttség vizsgálatára, darabosságára jó becslést ad a Laplace mátrixos gráf-vizsgálat [1], de ez nem mond semmit az elhelyezkedésre vonatkozóan.

Amennyiben képekről és kamerákról van szó, a különböző nézetek összeillesztése egy 3D-s keretbe a többnézetű geometriai leképezés egy fontos területe,

ahol a visszavetítés hibája biztosítja a jó konvergenciát. A "Bundle adjustment" módszerek [2] nemlineáris optimalizálási módszerekkel (Levenberg–Marquardt módszer [3]) a többnézetű képek összeillesztésére, a kamera és a vetítési paraméterek meghatározására lettek kidolgozva. Nagy tömegű kép, illetve nézet esetében azonban a számítás- és memória-igény nagyon megnövekszik, erre szolgálnak a 3D-ben megvalósított dekomponálási algoritmusok, pl. [4], melyek párhuzamosítják a nagy tömegű számítást, lebontva ezt kezelhető méretekre.

Sokszor azonban nem képeken dolgozunk, hanem többfajta szenzort használunk, és ezek egy csoportjára (tipikusan egy bekamerázott helyszín, vagy egy többkamerás robot vagy jármű) a 3D geometria már eleve kiszámítható, vagy az eszköz már eleve pontfelhőt ad a saját koordináta rendszerében (Kinect, Lidar, sztereó pár stb.). Vagyis nem képeket kell összerendelni, hanem a térben már elhelyezett, részben összekalibrált pontok alapján kell a szomszédos 3D egységek részben átfedő adataiból a teret felépíteni. Ebben a feladatban feltételezzük egy 3D-ben értelmezett geometriai gráf létezését, amiben az egyes 3D egységeken belül a helyzetek már ismertek, de az egyes egységek egymáshoz vett viszonya bizonytalan.

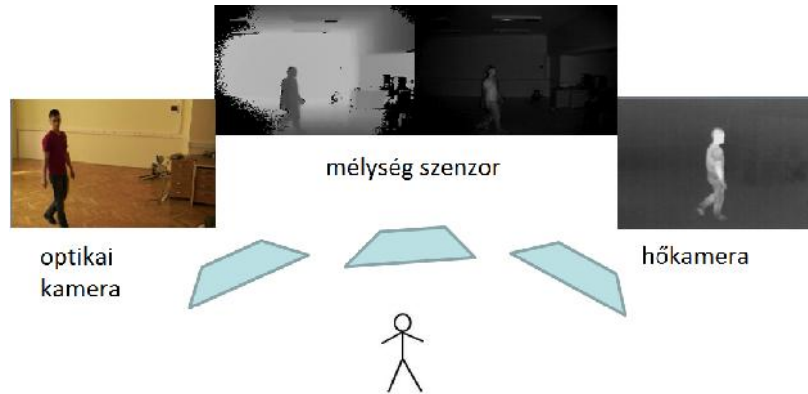
Ilyen 3D egységek lehetnek a látó robotok, a detektorokat hordozó automatikusan repülő eszközök, a fedélzeti kamerákkal bíró járművek, de a mobil eszközöket hordozó személyek is mind képesek, vagy képessé tehetők térben kalibrált képeket, illetve pontfelhőket készíteni:

- Fixen bekamerázott helyszín 3D kalibrációval [5],
- Mélységi kamerát hordozó UAV egység (3. kép jobbra, [6]),
- Sztereó kamerát hordozó jármű [7],
- Bármely mono kamerát tartalmazó beágyazott eszköz, amelynél megoldható a "structure from motion" leképezés [8],
- Mélységi kamerát és 2D kamerát tartalmazó fuzionált eszközök (1. kép, [9]),
- Nagy bázistávolságú videó kamerák "co-motion" összeregisztrálásával (3. kép bal ábra, [10]),
- Lidar lézer szkennerekkel készült 3D előtér/háttér térmodell [11],
- Kézben hordott mobil eszközök képeinek fuzionálása a mobil helyzet-adatok felhasználásával (2. kép, [12]).

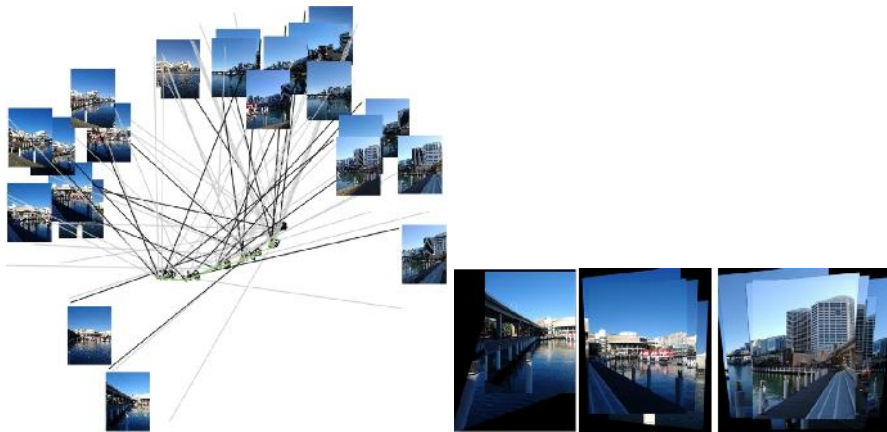
Jelen munkában a szenzor-tér és az adat-tér megközelítést együtt vizsgáljuk. Olyan matematikai modelleket vizsgálunk, amelyek lehetővé teszik geometriailag lokálisan kalibrált pontok összefűzését egy metrikusan egységes térben. Itt feltételezzük, hogy a szenzor-ágensekhez kötött egy vagy több érzékelő adataiból készült lokális térbeli modell metrikus teret állíthat elő egy kisebb környezetben. A különböző ágensek által előállított lokális modellek részben átfedhetnek, de az egymáshoz viszonyított helyzetüket nem ismerhetjük pontosan: a robot-ágensek egymástól függetlenül mozognak, sem egymástól való távolságukat, sem viszonylagos pozíciójukat nem, vagy csak hiányosan ismerjük.

A képtérben jellemző pontokat kiválasztva (pl. SIFT [13]), megkereshetjük a különböző ágensek átfedő területein levő pontokat, vagy karakterisztikus jellemzők hiányában mozgás-korrelációval [10] találhatunk közös pontokat.

Ezzel előáll egy olyan struktúra, amit az alábbiakkal jellemezhetünk:



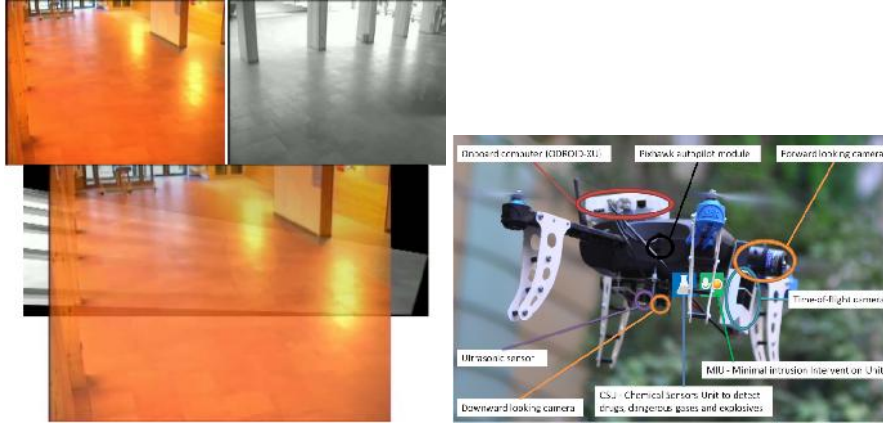
1. ábra. Mélységi MESA és optikai-/hő- kamerák képei [9]



2. ábra. Balra mobil kamerával készült részlegesen geo-datált képek a nézetüket tekintve csoportosítva, míg jobbra az összetartozó képek mozaikos fúziója [12]

- Kombinatorikailag merev részgráfok (KMG): Lokálisan ismerünk jellemző pontokat és azok fix távolságát,
- A KMG-k egymástól vagy elemeiktől vett kölcsönös távolságát nem, vagy csak részlegesen ismerjük,
- A jellemző pontok együtt kifeszítenek egy teret,
- Az egyes KMG-knek vannak átfedő részhalmazaik.

A cél az, hogy a KMG-k metrikáján alapulva, a jellemző pontok összességével fesszük ki a teret: egy tetszőleges viszonyítási ponthoz képest adjuk meg valamennyi, vagy minél több jellemző pont geometriai helyzetét. Ezt a problémát ismerjük gráf lokalizációs feladatként.



3. ábra. Balra nagy bázistávolságú kamerák összeregisztrálása és homográfiájának meghatározása a talajra vetett árnyék alapján [10] látható, jobbra pedig kamerákkal és mélységi szenzorokkal felszerelt UAV egység [6]

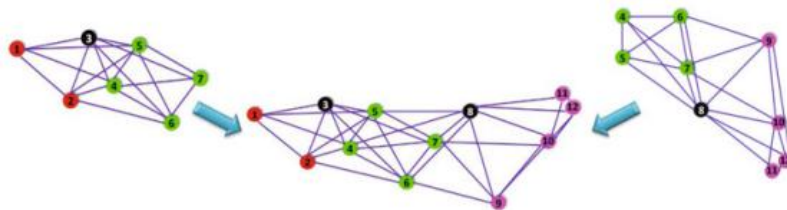
2. A lokalizációs feladat

Az első fejezetben ismertetett gyakorlati problémák megoldásánál tehát mindig meg kell oldanunk egy elméleti feladatot, ami már több évtizede foglalkoztatja a mérnököket és a matematikusokat. Ez a sok figyelmet kapott probléma tehát a kommunikáció és információ elmélet területéről ismert szenzor hálózatok lokalizációja. Egy lehetséges felírása ennek a következő: Ismeretlen vektorok (szenzorok) x_1, x_2, \dots, x_n sorozatához az \mathbf{R}^d , ($d = 1, 2, \dots$) Euklideszi térben meg kell találnunk a koordinátáikat úgy, hogy a szenzorok közötti távolságok (nem feltétlenül az összes), valamint néhány a_1, \dots, a_m fix szenzortól (horgonytól) vett távolságuk (nem feltétlenül az összes) adott mennyiségek.

Formálisabban legyen $A = \{(i, j) \in [n] \times [n] : \|x_i - x_j\|_2 = d_{ij}\}$, és $B = \{(i, k) \in [n] \times [m] : \|x_i - a_k\|_2 = e_{ik}\}$, ahol d_{ij}, e_{ik} adott távolságok, valamint $[n] = \{1, 2, \dots, n\}$. Ekkor a szenzor hálózatok lokalizációs problémája olyan $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ vektorok keresése, melyekre $\|x_i - x_j\|_2 = d_{ij}$ minden $(i, j) \in A$ párra és $\|x_i - a_k\|_2 = e_{ik}$ minden $(i, k) \in B$ párra.

A lokalizációs feladat ismert még gráf realizációs feladatként is, a távolság geometriai feladatok között [14]. Legyen adott a $G = (V, E)$ gráf, a gráf realizációs feladat olyan vektorok hozzárendelése a csúcsokhoz, hogy a vektorok közötti távolságok megegyeznek az élekhez rendelt mennyiségekkel. Ilyen távolság geometriai feladat egy molekula atomjainak a pozícióinak a megtalálása úgy, hogy ezen atomok között adottak a távolságok (lásd még:[15]). A távolság geometria ezen feladata a protein struktúrák meghatározásánál fordul elő a gyakorlatban.

A szenzor lokalizációs feladatra ismert négyzetösszegekkel (Sum of Squares) megadott módszer [16], ami közelíti a megoldást, de a mérésekből eredő bizonytalanság okozhat inkonzisztenciát a kapott eredményben. Illetve ismert még megoldó algoritmus a szemidefinit programozás eszközeivel is [17,18,19,20], viszont ezek mind igényelnek horgony pontokat, amiket mi szeretnénk elkerülni a mi megközelítésünkben. Általánosságban véve ez a feladat NP-nehéz [21,22,23] még a legegyszerűbb $d = 1$ esetben is.



4. ábra. A fenti ábra Cucuringu ASAP algoritmusából egy példa [24] Két már lokálisan jó közelítés összeillesztését mutatja egy nagyobb hálózatban. Látható, hogy 4 közös csúcsa van a két struktúrának, és az illeszhetőség érdekében egy tükrözést kell végrehajtanunk az egyik részgráfon.

A korábbi munkák lényegében két kategóriába oszthatók. Az egyik kategória konkrét feladatok realizációját megkereső megoldások [18,19,15,25,26,27,28], a másik pedig azzal foglalkozik, a kombinatorikus merevség eszközeinek a segítségével, hogy egyértelműen realizálható-e az adott feladat [29,30,31]. A mi cikkünk is ezekkel a kérdésekkel foglalkozna. Egy másik lehetséges osztályozása a lokalizációs algoritmusoknak a horgonypontot használó, illetve nem használó megoldások [32]. A horgonypontot használó algoritmusok felteszik, hogy minden referencia pont horgonypont, vagyis olyan pontok akiknek a valódi pozícióját is előre tudjuk. A horgonymentes algoritmusok ezzel szemben csak néhány horgonypontot igényelnek. Az összes referencia pont koordinátáját ezután automatikusan határozzuk meg. A tipikus horgonymentes algoritmusok a következőképpen működnek:

Először megbecsülik a referencia pontok koordinátáit. Számos módszert leírtak már erre a feladatra. Meerens és Fitzpatrick az 1-hop szomszédok és a multilaterációk segítségével konstruálnak egy globális koordinátarendszert [33]. Shang és Ruml több-dimenziós skálázást használnak a lokalizáció megvalósításához, ami sok figyelmet kapott mostanában [34].

Ezután jöhet a teljes, precíz lokalizációja a mobil eszközöknek, a referencia pontok segítségével.

Egy 2013-as eredményben Tan és szerzőtársai egy hatékony horgonymentes algoritmust írnak le 2 illetve 3 dimenzióban [35], de ez az algoritmus nagyon gyengén teljesít ritkán fedett szenzorhálózatokon, ami mérési pontok esetén egy valós gya-

korlati probléma tud lenni. Kwon et al. készítettek egy térkép feszítő lokalizációs eljárást nagy méretű vezeték nélküli szenzorhálózatokra [36].

A cikk további felépítése a következő. A 3. fejezetben áttekintjük a gráf realizációs feladatot, tehát amikor a kérdés a megvalósíthatóság és nem az egyértelműség, valamint a végén pár ismert algoritmust is megnézzünk erre a feladatra. A 4. fejezetben áttekintjük a gráf lokalizációs feladat horgonypontokkal segített változatát, tehát amikor a kérdés az egyértelműség és a feladat megoldásához néhány ismert koordinátájú, úgy nevezett horgonypontot is tudunk használni, valamint a végén pár ismert algoritmust is megnézzünk erre a feladatra. Az 5. fejezetben áttekintjük a gráf lokalizációs feladat horgonypont nélküli változatát, tehát amikor a kérdés az egyértelműség és a feladat megoldásához elvileg nem használunk ismert koordinátájú, úgynevezett horgonypontot hanem általában csak hiányos távolságinformációink vannak a pontpárokhoz, valamint a végén pár ismert algoritmust is megnézzünk erre a feladatra. A 6. fejezetben pedig megemlíjtjük a Bundle Adjustment (BA) módszert is, amellyel a feladathoz hasonló SLAM feladatra dolgoztak ki hatékony módszereket, és megvizsgáljuk a két probléma hasonló és eltérő vonásait, az esetleges kapcsolódási pontok megtalálásához.

3. Gráf Realizáció

Vegyünk objektumok egy halmazát az euklideszi térben, de helyzetük legyen ismeretlen. Meg szeretnénk határozni az objektumok relatív elhelyezkedését, de az egyetlen használható információnk az objektumok közti páronkénti távolságok egy részhalmaza. Ez a probléma a gráf realizációs probléma. Nyilvánvaló alkalmazásai lehetnek ennek a megfigyelő rendszerek és a műholdak elhelyezése [37,38].

Ehhez az adatokat jól reprezentálhatjuk egy $G = (V, E)$ gráffal. A V csúcshalmaz az objektumok, és egy $e_{ij} \in E$ él összeköti az i és j csúcsokat, ha a hozzájuk tartozó objektumok közti távolságot ismerjük. ($|V| = n, |E| = m$) Jelölje d_{ij} az e_{ij} élen mért távolságot. A gráf egy realizációja egy olyan p leképezés, amely minden csúcsot hozzárendel az euklideszi tér egy pontjához.

Ezt a feladatot gyakran nemlineáris globális optimalizálási feladatként fogalmazzák meg. Jelölje az i csúcs helyét p_i , ekkor könnyen konstruálhatunk egy $B(p)$ költség függvényt ami bünteti a még meg nem határozott változókat. Egy ilyen függvény lehet például a következő:

$$B(p) = \sum_{e_{ij}} \left(|p_i - p_j|^2 - d_{ij}^2 \right)^2$$

ahol $|\cdot|$ jelöli az euklideszi normát. Sajnos ez a naív megközelítés nem működik jól a gyakorlatban a probléma számítási bonyolultsága miatt. Saxe megmutatta, hogy a feladat erősen NP-teljes már egy dimenzióban is, és erősen NP-nehéz

a magasabb dimenziókban [23], tehát nem várhatjuk el, hogy létezzen polinomiális algoritmus az általános feladatra. A probléma egy lehetséges matematikai megfogalmazása tehát a következő: Adott $K > 0$ egész szám és egy egyszerű, irányítatlan $G = (V, E)$ gráf, melynek élei egy nemnegatív $d : E \rightarrow \mathbf{R}^+$ függvénnyel vannak súlyozva. El kell döntenünk, hogy létezik-e egy $x : V \rightarrow \mathbf{R}^K$ függvény, melyre:

$$\forall \{u, v\} \in E \quad \|x(u) - x(v)\| = d(\{u, v\}).$$

Néhány jelenleg ismert algoritmus erre a problémára:

1. Javanmard és Montanari algoritmus arra az esetre, amikor zajos méréseink vannak [39]
2. Fang és Toh algoritmus a molekula problémára [40], amely jól kezeli a ritka és zajos eseteket is, viszont azért ilyen hatékony, mert egyéb kémiai feltételeket, heurisztikákat is alkalmaz a probléma megoldásánál, amelyet általános esetben nem lehet feltenni szenzor hálózatokról.
3. Cucuringu ASAP algoritmus [24] mely felteszi, hogy egy globálisan merev struktúrát alkotnak a szenzorok, azaz egyértelműen realizálható a feladat, ami szintén nem tehető fel általánosan.
4. Islam és szerzőtársainak genetikus algoritmus [41], mely Fangék algoritmusához hasonlóan hatékony, viszont a genetikus algoritmus fitness függvényének heurisztikája szintén, kromoszómákra jellemző biológiai megfigyelések alapján kialakított heurisztikákra épül, ezért nehezen általánosítható.

Ezek az algoritmusok tehát annak eldöntésére szolgálnak, hogy egy adott feladat megoldható-e azokkal a bemeneti információkkal, amiket kap, illetve milyen információkat kell tudnia valakinek ahhoz, hogy megoldja ezt a feladatot. Természetesen ekkor még akár több megoldást is kaphatunk, pedig a gyakorlatban általában csak egyféle elhelyezkedése van a szenzoroknak egy időpillanatban. Az egyértelműség kérdése egy másik feladat, a következő fejezetben ezt vizsgáljuk.

4. Egyértelműség eldöntése horgonypontokkal

A másik említett probléma tehát annak eldöntése, hogy egyértelműen realizálható-e egy adott hálózat a kapott távolság információkból vagy nem. A probléma formális felírásához vegyük az előző fejezetben használt jelöléseket. Dolgozzunk a d -dimenziós euklideszi térben (ahol $d = 2$ vagy 3) és legyen $H \subset V$ egy k elemű részhalmaza a csúcsoknak, legyenek ők a horgonypontok (jelölje őket $h_i, i = 1, \dots, k$) és a többi $n - k$ darab "közönséges" csúcsot $V - H$ -ban jelöljük $v_j, j = k + 1, \dots, n$ jelöléssel. Minden csúcsnak van valahol egy fix helye az E^d térben, és hozzájuk van rendelve egy "szomszédos" csúcshalmaz. Tipikusan szomszédoknak minden más csúcsot szokás definiálni egy rögzített sugáron

belül, de más definíciók is ismertek a szakirodalomban. Most tekintsünk erre a szomszédosság definícióra úgy, mint egy szimmetrikus relációra az $\{1, \dots, n\}$ halmazon, vagyis a j csúcs pontosan akkor lesz szomszédja az i csúcsnak, ha az i is szomszédja a j -nek. Általában feltesszük, hogy az így definiált G gráf összefüggő. A feladatunk tehát meghatározni a v_i "közönséges" G -beli csúcsok helyét \mathbf{R}^d -ben, valamint a h_j horgonypontok helyzetét \mathbf{R}^d -ben, illetve a d_{ij} távolságokat minden $(i, j) \in E$ szomszéd párra.

A fent meghatározott módon definiált lokalizációs feladatra azt mondjuk, hogy *megoldható*, ha pontosan egy $\{x_{k+1}, \dots, x_n\} \in \mathbf{R}^d$ vektorhalmazra marad konzisztens a megadott G gráfban a $\{h_1, \dots, h_k\}$ horgonypontokkal és $d : E \rightarrow \mathbf{R}$ távolság függvényvel. Általában "generikus" megoldások keresése a cél, ami szabadon fogalmazva azt jelenti, hogy a problémának megoldhatónak kell maradnia nem csak a megadott adathalmazon, de a finoman perturbált verzióin is. Precízebben megfogalmazva a generikus megoldás a következőt jelenti. Rögzítsük le G -t és jelölje e_1, \dots, e_m az éleket E -ben. Figyeljük meg, hogy bármely y_1, \dots, y_n ponthalmazra \mathbf{R}^d -ben egyértelműen létezik egy z távolság vektor, melynek a k . komponense éppen az y_i, y_j pontok távolsága, ahol $(i, j) = e_m$. Tehát létezik egy jól definiált $f : \mathbf{R}^{nd} \rightarrow \mathbf{R}^{kd+m}$ leképezés $\{y_1, \dots, y_n\} \rightarrow \{h_1, \dots, h_k, z\}$. A megoldhatóság tehát valójában azt jelenti, hogy f injektív, azaz ha létezik olyan $\{y_1, \dots, y_n\} \in \mathbf{R}^{nd}$ ponthalmaz, melyre $f(y_1, \dots, y_n) = f(x_1, \dots, x_n)$ akkor $\{y_1, \dots, y_n\} = \{x_1, \dots, x_n\}$.

Az egyértelműség ilyen vizsgálatára pár ismert algoritmus:

1. Savvides és szerzőtársainak algoritmus [26] a legkisebb négyzetek módszerén alapszik, ami az összes csúcsnak csak egy kis hányadára követeli meg, hogy horgonypont legyen. Viszont ez a módszer kihasználja, hogy sűrű hálózaton van alkalmazva, ritka hálózatokon viszonylag gyengén teljesít.
2. Wei Cheng és szerzőtársainak algoritmus [42] egy nagyon hasonló problémát old meg, csak itt időkorlátos megoldást keresnek, tehát a minimális időt próbálják meghatározni a lokalizációhoz. A megoldásuk elfogadhatóan teljesít a flooding-alapú protokollokat használó szenzorokon, viszont a többi ismert protokollokon (mint például a SPEED [43]) még nem működik.
3. Azim és szerzőtársainak algoritmus [44] egy kereszt-entrópia alapú optimalizációra [45] épít hatékonyan, de ők is kihasználják, hogy sűrű a hálózat valamint a horgonypontokat speciálisan a megfigyelt terület négy sarkára helyezték el az eredményesség növelésének érdekében, de természetesen ezt sem lehet általánosan feltenni.

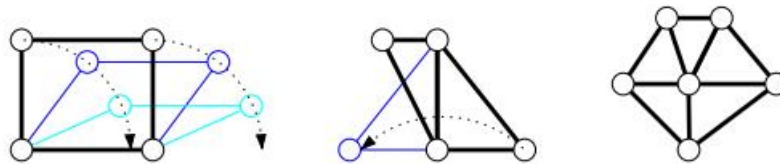
Ezek az algoritmusok már jól megközelítik az előző fejezetben ismertetett lokalizációs feladat megoldásait. Természetesen, mivel ez a feladat NP-nehéz, nem várhatunk tökéletes megoldó algoritmust, de nagyon jó közelítő algoritmusokban reménykedhetünk, ahogy azt a fenti eredmények is bizonyítják.

5. Egyértelműség eldöntése horgonypontok nélkül

Léteznek azonban horgonypontokat nem használó módszerek is. Kiindulásnak ugyanúgy van n darab címkézett csúcsunk elhelyezve egy fizikai térben. Fel-

tesszük, hogy létezik egy mechanizmus, amellyel a szenzorok meg tudják találni a szomszédikat, vagyis tudnak kommunikálni egymással, és meg tudják becsülni azt a sugarat (szeparáló távolságot) ami biztosan elválasztja őket, minden egyes szomszédjukhoz.

Az eddigi jelöléseket használva a problémánk a következőképpen írható le. Adott csúcsok egy halmaza valamint a csúcsok távolság számításai a szomszédaihoz, és a célunk az, hogy az összes távolsággal konzisztens koordinátákat rendeljünk a csúcsokhoz. Vegyük észre, hogy ez a hozzárendelés legfeljebb elforgatás, eltolás és esetleg tükrözés erejéig lehet egyértelmű. Viszont léteznek gráfok, melyekre még így sem lehet egyértelműnek nevezni egy hozzárendelést. Ezt látjuk a 5 ábrán is, amelyen a bal oldali gráf nem merev, a középső merev de nem globálisan merev, a jobb oldali pedig globálisan merev.



5. ábra. példák különböző merevségű gráfokra

Ha egy rúd-csukló szerkezetként gondolunk a gráfra, akkor annak merevnek kell lennie abban az értelemben, hogy nem tudjunk meghajlítani a távolságok megtartásával (mint például a négy hosszú kört). Az automatikus lokalizációhoz tehát, ha csak távolság információk vannak adva számunkra, akkor globálisan merev struktúrára van szükségünk, aminek pontosan egyféle beágyazása van a térbe.

De még ha globálisan merev is a gráfunk, egyértelmű beágyazással, akkor is NP-nehéz találni egy általánosan jó beágyazást [23,46]. A legtöbb megoldás hibásan működik bizonyos megszorítások feltétele nélkül (például a növelő módszerek nem működnek jól addig, amíg elég nagy nem lesz a csúcsok sűrűsége). Valamint praktikusán a zajos mérések is megnehezítik ennek a módszernek az optimális megoldását.

A horgonypontokat nem tartalmazó algoritmusok közül néhány újabb található lentebb:

1. Tan és szerzőtársainak algoritmus a CATL (Connectivity-based and Anchor-free Three-dimensional Localization) [35] konkáv régiókon is hatékonyan oldja meg a horgonypont nélküli lokalizációs feladatot, ha a szenzorok elég sűrűn és egyenletesen vannak elszórva a vizsgált területen. Amennyiben viszont nem elég sűrű a szenzorok elhelyezése, vagy nagyon nem egyenletes az eloszlásuk, akkor sajnos elég gyengén is tud teljesíteni.

2. Hussin és Nakamoto algoritmus a DSML (Distance-Based Sequence for Mobile Localization) [47] mobil eszközök lokalizációra lett kitalálva, amely a beérkező jelek erőssége alapján próbálja megoldani a feladatot. A fuzzy logika elemeit alkalmazó megoldásuk egy legfeljebb 80 százalékos közelítő megoldást ad a problémára, de a bonyolultsága lehetővé teszi, hogy folyton változó topológiájú mobil szenzorok hálózatára is alkalmazzák.
3. Isokawa és szerzőtársainak algoritmus [48] Kalman szűrő alkalmazásával próbálja megoldani a feladatot ZigBee szenzorok hálózatára. Cél náluk is, hogy mobil szenzorokra működjön a megoldásuk, egyelőre viszont még csak legfeljebb 1 mozgó szenzorral működik a megoldásuk, tehát van még mit fejleszteni.

6. Összevetés a "Bundle Adjustment" módszerekkel

Eddig a szenzorok elhelyezkedésének vizsgálatával foglalkoztunk, viszont egy másik értelmes probléma is megfogalmazható a lokalizációs feladatoknál. Mégpedig, amikor egy szenzor haladásának útvonalát szeretnénk feltérképezni, referenciapontok elhelyezkedésének pontosításával. Ez a feladat a SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) aminek a megoldásához, a magyarul kicsit furcsán hangzó ("nyaláb helyesbítés") Bundle Adjustment (BA) technikát is használják. Maga a BA egy optimalizálási technika a nemlineáris legkisebb négyzetek módszere alapján [2]. Az E célfüggvény, amit minimalizálni szeretnénk általában egy kép-alapú MSE (Mean Squared Error): a visszavetítési hiba $E(x_t, z_t^c) = \epsilon_c^2(x_t, z_t^c)$, azaz a 2 dimenziós z_t^c megfigyelések és a visszavetítések közti távolságok négyzetösszege.

A BA különböző célokra használható, attól függően, hogy milyen bemeneti értékeket adunk meg, amiket optimalizálni szeretnénk. Gyakori BA feladatok: pozíció finomítása, helyszín struktúrájának pontosítása, helyszín és a mozgás egyidejű korrigálása, de akár az önkalibráció is lehet, amikor finomítjuk a belső paramétereit a kamerának (például a fókuszpontot). Például amikor a helyszín struktúráját és a kamera mozgását egyszerre szeretnénk finomítani, akkor egy nemlineáris legkisebb négyzetek feladatot kapunk, amit egy tompított Gauss-Newton technikával, például a Levenberg-Marquardt eljárással tudunk megoldani [3]. Ezen feladatok azonban egyelőre nem több szenzor helyzetének elhelyezkedését próbálják egyszerre meghatározni, hanem egy mozgó szenzor útvonalát próbálják visszakövetni, esetleg több szenzor mozgását is akár [49]. Így bár lokalizációs feladat mindkettő, egyelőre nehéz olyan modellt készíteni, amely mindkét feladatot egyszerre jól oldja meg.

Természetesen a SLAM problémára sem a BA az egyetlen megoldás. Strasdat és szerzőtársainak cikkében például összehasonlítják a BA módszert a szűrőket használó eljárásokkal, amely analízis alapján a szűrő-alapú SLAM hasznosabb mint a BA, ha kicsi a feldolgozóképesége a rendszerünknek, más egyéb esetekben pedig a BA ajánlatosabb [50]. Valamint a klasszikus BA mellett új módszerek is készülnek, melyek valamiben próbálnak jobban teljesíteni, mint például gyorsabb konvergencia és robusztusság a hibás közelítő pontok esetén is [51], de például

ez az eljárás még nem online, valamint kalibrálatlan rendszerekre sem lehet még alkalmazni. Eudes és szerzőtársai pedig távolságmérővel (odometer) mért adatokkal próbáltak pontosítani a klasszikus BA alapú SLAM megoldó algoritmuson [52].

7. Kiértékelés

A bemutatott gráf-optimalizálási eljárások lehetővé teszik a hálózatba szervezett szenzorok részlegesen ismert geometriai viszonyaiból a teljes hálózat pontos geometriájának kinyerését, vagy legalábbis annak jó becslését.

A szenzorok által lefedett megfigyelési területeket is összefüggő 3D kép/adat térré alakíthatjuk úgy, hogy különböző modalitásokat és 2D/3D információkat fuzionálunk egy keretbe.

Ehhez a gráf realizációs illetve lokalizációs feladat különböző közelítő algoritmusait vizsgáltuk és néztük át, hogy melyik algoritmus milyen erősséggel illetve gyenge ponttal rendelkezik a lehetséges különböző valós alkalmazásokhoz. Az algoritmusok sebességét nem hangsúlyoztuk ki, mert a legtöbb algoritmus a valós időt tűzte ki célul, hogy mobil eszközöknél is alkalmazhatók legyenek. Ha valamelyik algoritmus látványosan messze került ettől, azt külön jeleztük, a többi pedig nagyon közel van ehhez a teljesítményhez, úgyhogy ezek futásidő optimalizálása is lehet egy fontos feladat a jövőben.

Természetes kérdés még, illetve természetes igény lenne ezek alapján kijelölni egy általános megoldó algoritmust, amit a legjobb alkalmazni. De mint ahogy a problémák is nagyon sokszínűek, és a megoldásukra rendelkezésül álló eszközök is nagyon különbözőek lehetnek, így elég nehéz kiválasztani párat, mint a jó algoritmusok. Mindig meg kell vizsgálni, hogy a feladat specifikációja mely eljárások alkalmazását teszik a leginkább indokolttá.

Hivatkozások

1. Peng Yang, Randy A. Freeman, Geoffrey J. Gordon, Kevin M. Lynch, Siddhartha S. Srinivasa, and Rahul Sukthankar, „Decentralized estimation and control of graph connectivity for mobile sensor networks.,” *Automatica*, vol. 46, no. 2, pp. 390–396, 2010.
2. Bill Triggs, P. McLauchlan, Richard Hartley, and A. Fitzgibbon, „Bundle adjustment – a modern synthesis,” in *Vision Algorithms: Theory and Practice*, B. Triggs, A. Zisserman, and R. Szeliski, Eds. 2000, vol. 1883 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 298–372, Springer-Verlag.
3. D. Marquardt, „An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters,” *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 11, no. 2, pp. 431–441, 1963.
4. Kai Ni, D. Steedly, and F. Dellaert, „Out-of-core bundle adjustment for large-scale 3d reconstruction,” in *Computer Vision, 2007. ICCV 2007. IEEE 11th International Conference on*, Oct 2007, pp. 1–8.
5. Ákos Kiss and Tamás Szirányi, „Localizing people in multi-view environment using height map reconstruction in real-time,” *Pattern Recognition Letters*, vol. 34, no. 16, pp. 2135 – 2143, 2013.

6. A.L. Majdik, D. Verda, Y. Albers-Schoenberg, and D. Scaramuzza, „Micro air vehicle localization and position tracking from textured 3d cadastral models,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, May 2014, pp. 920–927.
7. C. Stiller, W. Pochmuller, and B. Hurtgen, „Stereo vision in driver assistance systems,” in *Intelligent Transportation System, 1997. ITSC '97., IEEE Conference on*, Nov 1997, pp. 888–893.
8. Jan J. Koenderink and Andrea J. van Doorn, „Affine structure from motion,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 8, no. 2, pp. 377–385, Feb 1991.
9. L. Havasi, A. Kiss, L. Spórács, and T. Szirányi, „Calibrationless sensor fusion using linear optimization for depth matching,” *XVI. International Workshop on Combinatorial Image Analysis, LNCS 8466*, vol. LNCS 8466, pp. 158–170., 2014.
10. L. Havasi, T. Szirányi, and Z. Szlávik, „Stochastic view registration of overlapping cameras based on arbitrary motion, ieee,” *IEEE Tr. Image Processing*, vol. 16 3, pp. 710–720, 2007.
11. C. Benedek, Z. Janko, C. Horvath, D. Molnar, D. Chetverikov, and T. Sziranyi, „An integrated 4d vision and visualisation system,” *Int. Conf. Computer Vision Systems, St. Petersburg, Russia*, vol. 7963, pp. 21–30, 2013.
12. L. Kovács, „Processing geotagged image sets for collaborative compositing and view construction,” in *Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (IEEE Intl. Workshop on Computer Vision for Converging Perspectives)*, 2013, pp. 460–467.
13. D. Lowe, „Distinctive image features from scale invariant keypoints,” *International Journal of Copmputer Vision*, pp. 91–110, 2004.
14. L. Blumenthal, „Theory and applications of distance geometry,” *Chelsea Publishing Company, Bronx*, 1970.
15. B. Hendrickson, „The molecule problem: Exploiting structure in global optimization,” *SIAM J. Optim.*, vol. 5, pp. 835–857, 1995.
16. J. Nie, „Sum of squares method for sensor network localization,” *Computational Optimization and Applications*, vol. 43.2, pp. 151–179, 2009.
17. A.M. So, „Theory of semidefinite programming for sensor network localization,” *Mathematical Programming*, vol. 109, pp. 367–384, 2007.
18. P. Biswas and Y. Ye, „Semidefinite programming for ad hoc wireless sensor network localization,” *Proceedings 3rd IPSN*, pp. 46–54, 2004.
19. L. Doherty, L.E. Ghaoui, and S.J. Pister, „Convex position estimation in wireless sensor networks,” *Proceedings 20th INFOCOM*, vol. 3, pp. 1655–1663, 2001.
20. T. Liang, T. Wang, and Y. Ye, „A gradient search method to round the semidefinite programming relaxation solution for ad-hoc wireless sensor network localization,” *Sanford University, Formal report*, 2004.
21. J. Aspnes, D. Goldberg, and Y.R. Yang, „On the computational complexity of sensor network localization,” *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3121, pp. 32–44, 2004.
22. J. Moré and Z. Wu, „Global continuation for distance geometry problems,” *SIAM J. Optim.*, vol. 7, pp. 814–836, 1997.
23. J. Saxe, „Embeddability of weighted graphs in k-space is strongly np-hard,” *Proc. 17th Allerton Conference in Communications, Control, and Computing, Monticello*, pp. 480–489, 1979.
24. M. Cucuringu, „Asap: An eigenvector synchronization algorithm for the graph realization problem,” *Distance Geometry*, pp. 177–195, 2013.

25. C. Savarese, J. Rabay, and K. Langendoen, „Robust positioning algorithms for distributed ad-hoc wireless sensor networks,” *USENIX Annual Technical Conference*, 2002.
26. A. Savvides, C. Han, and M.B. Srivastava, „Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors,” *Proceedings 7th MOBICOM*, pp. 166–179, 2001.
27. A. Savvides, H. Park, and M.B. Srivastava, „The bits and flops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems,” *Proceedings 1st WSNA*, pp. 112–121, 2002.
28. Y. Shang, W. Ruml, Y. Zhang, and M.P.J. Fromherz, „Localization from mere connectivity,” *Proc. 4th MOBIHOC*, pp. 201–212, 2003.
29. T. Eren, D.K. Goldenberg, W. Whiteley, Y.R. Yang, A.S. Moore, B.D.O. Anderson, and P.N. Belhumeur, „Rigidity, computation, and randomization in network localization,” *Proceedings 23rd INFOCOM*, 2004.
30. J. Graver, B. Servatius, and H. Servatius, „Combinatorial rigidity,” *AMS*, 1993.
31. B. Jackson and T. Jordán, „Connected rigidity matroids and unique realizations of graphs,” *Journal of Combinatorial Theory*, vol. 94.1, pp. 1–29, 2005.
32. N.B. Priyantha, H. Balakrishnan, E. Demaine, and S. Teller, „Anchor free distributed localization in sensor networks,” *Proceedings of 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, vol. 43.2, pp. 340–341, 2003.
33. L. Meertens and S. Fitzpatrick, „The distributed construction of a global coordinate system in a network of static computational nodes from inter-node distances,” *Tech. Report, Palo Alto*, 2004.
34. Y. Shang and W. Ruml, „Improved mds-based localization,” *Proceedings of the Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 4, pp. 2640–2651, 2004.
35. G. Tan, H. Jiang, S. Zhang, Z. Yin, and A.M. Kermarrec, „Connectivity-based and anchor-free localization in large-scale 2d/3d sensor networks,” *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 10.1, 2013.
36. O.K. Kwon and H.J. Song, „Localization through map stitching in wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Parallel Distributed Systems*, vol. 19, pp. 93–105, 2008.
37. K. Killian and P. Meissl, „Einige grundaufgaben der räumlichen trilateration und ihre geführlichen örter,” *Deutsche Geodätische Komm. Bayer. Akad. Wiss.*, vol. A61, pp. 65–72, 1969.
38. W. Wunderlich, „Untersuchungen zu einem trilaterations problem mit komplaneren standpunkten,” *Sitz. Osten. Akad. Wiss*, vol. 186, pp. 263–280, 2013.
39. A. Javanmard and A. Montanari, „Localization from incomplete noisy distance measurements,” *Foundations of Computational Mathematics*, vol. 13.3, pp. 297–345, 2013.
40. X. Fang and K. Toh, „Using a distributed sdp approach to solve simulated protein molecular conformation problems,” *Distance Geometry*, pp. 351–376, 2013.
41. M.D. Islam, S. Shatabda, and M. Sohel Rahman, „Gremutrrr: A novel genetic algorithm to solve distance geometry problem for protein structures,” *arXiv preprint*, 2014.
42. W. Cheng, N. Zhang, X. Cheng, M. Song, and D. Chen, „Time-bounded essential localization for wireless sensor networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 21.2, pp. 400–412, 2013.
43. T. He, J.A. Stankovic, C. Lu, and T. Abdelzaher, „Speed: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks,” *Proc. 23rd ICDCS*, pp. 46–55, 2003.
44. M.A. Azim, Z. Aung, W.M. Xiao, and V. Khadkikar, „Localization in wireless sensor networks by cross entropy method,” *Ad Hoc Networks*, pp. 103–118, 2013.

45. R.Y. Rubinstein and D.P. Kroese, „The cross-entropy method: A unified approach to combinatorial optimization, monte-carlo simulation, and machine learning,” *Springer-Verlag, New York*, 2004.
46. Y. Yemini, „Some theoretical aspects of position-location problems,” *Proceedings of the 20th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 1–8, 1979.
47. Z. Hussin and Y. Nakamoto, „Assuring location estimation accuracy of anchor-free mobile localization in wireless sensor networks,” *IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, pp. 351–356, 2013.
48. T. Isokawa, S. Motomura, J. Ohtsuka, H. Kawa, S. Nakashima, N. Kamiura, and N. Matsui, „An anchor-free localization scheme with kalman filtering in zigbee sensor network,” *ISRN Sensor Networks*, 2013.
49. J. Michot, A. Bartoli, and F. Gaspard, „Bi-objective bundle adjustment with application to multi-sensor slam,” *3DPVT'10*, 2010.
50. H. Strasdat, J.M.M. Montiel, and A.J. Davison, „Real-time monocular slam: Why filter?,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2657–2664, 2010.
51. R. Steffen, J.M. Frahm, and W. Förstner, „Relative bundle adjustment based on trifocal constraints,” *Trends and Topics in Computer Vision*, pp. 282–295, 2012.
52. A. Eudes, M. Lhuillier, S. Naudet-Collette, and M. Dhome, „Fast odometry integration in local bundle adjustment-based visual slam,” *20th IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, pp. 290–293, 2010.