

Model Matematika dalam Pemilihan mekanisme koordinasi pada sistem Multiagen menggunakan proses markov

Maxtulus Junedy Nababan¹ dan Gayus Simarmata²

¹Program Studi Matematika, Fakultas MIPA, Universitas Mataram, Nusa Tengara Barat, Indonesia

²Program Studi Matematika, Fakultas MIPA, Universitas HKBP Nommensen, Sumatra Utara, Indonesia

Email Corresponding Author: maxtnab@staff.unram.ac.id

Info Artikel

Article history:

Kirim, 13 November
2025

Terima, 22 Desember
2025

Publikasi Online, 26
Desember 2025

Kata-kata kunci:

Model Matematika;
Dynamic Selection;
Markov Process;
Multi agent;

ABSTRAK

Artikel ini menyajikan dan mengevaluasi kerangka pengambilan keputusan yang memungkinkan agen otonom untuk secara dinamis memilih mekanisme yang mereka gunakan untuk mengoordinasikan kegiatan yang saling terkait dalam konteks sekolah yang berkelanjutan. Dengan mengadopsi kerangka kerja Proses Markov, mekanisme koordinasi bergeser dari yang telah ditentukan sebelumnya pada waktu desain menjadi dipilih secara adaptif oleh agen pada waktu berjalan sesuai dengan kondisi dan kebutuhan koordinasi yang berlaku. Melalui pendekatan ini, agen dapat membuat keputusan yang tepat mengenai kapan dan bagaimana berkoordinasi, serta kapan harus menanggapi permintaan koordinasi. Kerangka kerja dievaluasi secara empiris menggunakan skenario dunia grid, dan hasilnya menyoroti jenis lingkungan di mana ia paling efektif. Penelitian di masa depan direkomendasikan untuk menerapkan kerangka kerja ini ke pengaturan yang lebih kompleks dan realistik, menggabungkan metode berbasis pembelajaran untuk meningkatkan kemampuan beradaptasi di bawah ketidakpastian, dan mengevaluasi kinerja menggunakan indikator keberlanjutan yang lebih luas untuk meningkatkan relevansi praktis dan generalisasinya.

1. PENDAHULUAN

Koordinasi yang efektif sangat penting jika agen otonom ingin mencapai tujuan bersama dalam sebuah sistem multiagen (MAS). Koordinasi ini diperlukan untuk mengelola berbagai bentuk ketergantungan yang secara alami terjadi ketika agen memiliki tujuan yang saling terkait, ketika mereka berbagi lingkungan yang sama, atau ketika ada sumber daya yang dibagikan (Rother et al., 2025). Untuk tujuan ini, berbagai protokol dan struktur telah dikembangkan untuk mengatasi masalah koordinasi (Gnanamani & Kumaravel, 2025). Seperti mekanisme hukum sosial jangka panjang (Shoham & Tennenholtz, 1992), mekanisme jangka menengah seperti Perencanaan Global Parsial (Durfee et al., 2018), pengorganisasian struktur (Carvalho et al., 2025) dan protokol pasar (Malone, 1987), hingga mekanisme satu kali (jangka pendek) seperti Protokol Jaringan Kontrak (Shen, 2018).

Semua mekanisme koordinasi ini memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda dan cocok untuk berbagai jenis tugas dan lingkungan. Mekanisme koordinasi bervariasi di mana koordinasi ditentukan berdasarkan desain waktu, jumlah waktu dan usaha yang mereka

butuhkan untuk menyiapkan mekanisme koordinasi tertentu pada waktu berjalan, di mana mereka kemungkinan besar akan berhasil dan menghasilkan perilaku terkoordinasi dalam situasi tertentu (Rother et al., 2025). Dalam sebagian besar kasus, dimensi-dimensi ini bertindak sebagai kekuatan dalam arah yang berlawanan; mekanisme koordinasi yang sangat mungkin berhasil biasanya memiliki persiapan biaya dan pemeliharaan yang tinggi, sedangkan mekanisme yang memiliki persiapan biaya yang lebih rendah juga mungkin gagal (Tarasova et al., 2025). Selain itu, mekanisme koordinasi yang bekerja dengan baik dalam lingkungan yang relatif statis seringkali akan berkinerja buruk dalam lingkungan yang dinamis dan cepat berubah(Yang et al., 2025). Singkatnya, tidak ada mekanisme koordinasi terbaik secara universal.

Berdasarkan masalah ini, penting bagi para agen untuk memiliki berbagai mekanisme koordinasi, dengan berbagai sifat, yang dapat mereka gunakan sehingga mereka dapat memilih mekanisme yang sesuai dengan peristiwa koordinasi yang sedang berlangsung(He et al., 2024). Dengan demikian, untuk tugas-tugas yang sangat penting, para agen dapat memilih untuk mengadopsi mekanisme koordinasi yang sangat mungkin berhasil, tetapi yang pasti akan memiliki biaya pengaturan yang besar(He et al., 2024). Sedangkan untuk tugas-tugas yang kurang penting, mekanisme yang kurang mungkin berhasil, tetapi memiliki biaya pengaturan yang lebih rendah, mungkin lebih tepat (Tarasova et al., 2025). Demikian pula, ketika sulit atau mahal untuk mengatur aktivitas koordinasi (misalnya karena tidak banyak agen yang tersedia), tepat untuk memilih mekanisme yang sangat mungkin berhasil (meskipun akan memiliki biaya pengaturan yang tinggi)(Radeva et al., 2025). Sebaliknya, jika koordinasi dapat diatur dengan mudah atau murah, maka mungkin lebih penting untuk memilih mekanisme yang menjanjikan untuk mencapai tugas tersebut dengan cara secepat mungkin. Namun, hingga saat ini, pilihan mekanisme koordinasi yang akan digunakan dalam situasi tertentu biasanya ditentukan oleh perancangan pada saat perancangan (misalnya, dalam aplikasi tertentu akan digunakan hukum sosial tertentu atau akan diputuskan bahwa semua aktivitas koordinasi akan ditangani oleh protokol jaringan kontrak)(Mallampati et al., n.d.). Ini berarti bahwa dalam banyak kasus, mekanisme koordinasi yang digunakan tidak sesuai dengan keadaan agen yang ada. Ketidakfleksibelan ini berarti bahwa kinerja agen individu dan sistem secara keseluruhan dapat terganggu.

Untuk memperbaiki situasi ini, tujuan kami dalam penelitian ini adalah untuk mengembangkan agen yang dapat bernalar tentang proses koordinasi dan kemudian memilih mekanisme yang sesuai dengan situasi mereka saat ini. Artinya, pilihan mekanisme koordinasi dibuat pada saat runtime oleh agen yang perlu berkoordinasi. Dengan demikian, kami berpendapat bahwa menetapkan satu mekanisme koordinasi pada saat perancangan tidaklah tepat, karena tidak ada ruang untuk mengubah atau memodifikasi mekanisme tersebut untuk memastikan kesesuaian yang baik dengan keadaan yang berlaku (Bourne et al., n.d.). Kami percaya masalah ini dapat dipecahkan dengan proses markov dalam lingkungan yang terbuka dan dinamis, karena beragamnya konteks di mana koordinasi kemungkinan dibutuhkan, khususnya dalam domain sekolah berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif berbasis pemodelan dan simulasi dengan pendekatan eksperimental. Pendekatan ini digunakan untuk menganalisis pengambilan keputusan agen dalam memilih mekanisme koordinasi secara dinamis pada sistem multiagen guna mencapai keberlanjutan sekolah. Kerangka pengambilan keputusan dimodelkan menggunakan Proses Markov dengan horizon tak terbatas untuk mengevaluasi kinerja jangka panjang mekanisme koordinasi.

Lingkungan dan Skenario Penelitian

Lingkungan penelitian dirancang dalam bentuk grid world abstrak yang merepresentasikan ruang interaksi agen. Pemilihan lingkungan abstrak dilakukan untuk memfokuskan analisis pada perilaku koordinasi agen tanpa terikat pada kompleksitas dunia nyata. Dalam lingkungan ini terdapat sejumlah agen otonom yang bergerak secara simultan dan menghadapi dua jenis tugas, yaitu Single Task (ST) dan Cooperative Task (CT).

ST hanya dapat diselesaikan oleh satu agen tertentu.

CT memerlukan koordinasi beberapa agen dan memberikan imbalan yang lebih besar dibandingkan ST.

Karakteristik Agen dan Mekanisme Koordinasi

Setiap agen memiliki tujuan untuk memaksimalkan laju imbalan rata-rata per satuan waktu. Agen dibekali seperangkat mekanisme koordinasi (Coordination Mechanism/CM) yang diparameterisasi oleh:

1. Biaya pengaturan (t), yaitu jumlah langkah waktu yang dibutuhkan untuk menyiapkan koordinasi.
2. Probabilitas keberhasilan (p), yaitu peluang keberhasilan koordinasi dalam menyelesaikan CT.

Agen dapat memilih untuk:

1. Mengadopsi salah satu mekanisme koordinasi yang tersedia, atau
2. Tidak melakukan koordinasi (CM nol) apabila koordinasi diperkirakan tidak menguntungkan.

Model Proses Markov

Model Proses Markov digunakan untuk merepresentasikan dinamika pemilihan mekanisme koordinasi dalam konteks sekolah berkelanjutan, dengan komponen sebagai berikut:

1. State: kondisi keberlanjutan sekolah yang diklasifikasikan menjadi rendah, sedang, dan tinggi.
2. Action: pilihan mekanisme koordinasi yang meliputi mekanisme terpusat, desentralisasi, kolaboratif, dan adaptif.

3. Transition Probability: peluang perpindahan antar kondisi sekolah akibat penerapan mekanisme koordinasi tertentu.
4. Reward: nilai keberlanjutan yang diperoleh sebagai hasil penerapan mekanisme koordinasi.

Prosedur Pengambilan Keputusan Agen

Agen melakukan empat jenis keputusan utama, yaitu:

1. Menentukan arah pergerakan menuju tujuan berdasarkan jarak relatif pada grid.
2. Memilih mekanisme koordinasi yang memaksimalkan surplus imbalan yang diharapkan.
3. Menentukan besaran tawaran imbalan ketika menerima permintaan koordinasi.
4. Memilih tawaran agen lain yang memberikan surplus tertinggi dengan mempertimbangkan biaya dan waktu tunggu.

Keputusan agen dihitung menggunakan estimasi jarak rata-rata, biaya penyimpangan dari tujuan awal, serta probabilitas keberhasilan mekanisme koordinasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian koordinasi.

Domain tempat kami melakukan evaluasi berbentuk grid di mana sejumlah agen otonom (A_i) melakukan tugas-tugas untuk mereka menerima unit imbalan (R_i). Setiap agen memiliki tugas spesifik (ST) yang hanya dapat dilakukannya; ada tugas lain yang membutuhkan beberapa agen untuk melakukannya, yang disebut tugas kooperatif (CTs). Setiap tugas memiliki imbalan yang terkait pekerjaannya, imbalan untuk CT lebih tinggi daripada ST karena harus dibagi di antara agen-agen yang berkoordinasi.

Agen-agen bergerak di sekitar grid selangkah demi selangkah, naik, turun, kiri atau kanan, atau tetap diam. Pada setiap saat, setiap agen memiliki satu tujuan, baik ST atau CT yang mungkin perlu dikoordinasikan. Setelah tiba di keadaan yang berisi tujuannya, agen menerima imbalan yang terkait. Dalam kasus ST, yang muncul secara acak di suatu tempat di grid, hanya terlihat oleh agen yang sesuai tujuan, agen menerima imbalan yang terkait. Dalam kasus ST, yang baru muncul, secara acak, di suatu tempat di grid, hanya terlihat oleh agen yang sesuai. Dalam kasus CT, yang muncul, secara acak, di suatu tempat di grid, tetapi ini hanya terlihat oleh agen yang kemudian tiba di peristiwa itu. Jika seorang agen menemui CT, saat mengejar tujuannya saat ini (yaitu, ST), ia mengambil alih CT dan harus memutuskan baik apakah akan memulai koordinasi dengan agen lain untuk tugas ini, dan mekanisme koordinasi (CM) mana yang harus digunakan.

Dalam konteks ini, setiap agen memiliki rentang CM yang telah ditentukan sebelumnya yang tersedia. Setiap CM diparameterisasi oleh dua atribut kunci: biaya pengaturan (dalam keadaan waktu) dan peluang keberhasilan. Misalnya, sebuah CM mungkin memerlukan t langkah waktu untuk disiapkan (dimodelkan dengan agen menunggu jumlah langkah waktu itu sebelum meminta tawaran dari agen lain) dan memiliki probabilitas, p , keberhasilan (sehingga ketika agen lain tiba di kondisi CT, imbalan akan dialokasikan dengan probabilitas p , dengan

imbalan nol jika tidak). Seorang agen mungkin memutuskan bahwa mencoba untuk berkoordinasi bukanlah pilihan yang layak, dalam hal ini ia mengadopsi CM nol (yaitu agen menolak mengadopsi CT sebagai tujuannya).

Agen yang Bertanggung Jawab (AiC) pada koordinasi memilih CM dan, setelah menunggu periode pengaturan, membuat penawaran untuk agen lain untuk terlibat dalam koordinasi. Jika tawaran agen berhasil, maka ia disebut Agen dalam Kerjasama (AiCoop) untuk menunjukkan fakta bahwa ia adalah peserta (bukan AiC) untuk CT.

1. Agen tiba di sebuah keadaan. Jika AiS tiba di sel ST-nya, tujuannya tercapai, ia menerima imbalan dan memperbarui tujuannya. Jika AiCoop tiba di sel CT, ia memberi tahu AiC bahwa ia telah tiba. CT tercapai dan imbalan dibayarkan kepada AiCoop.
2. Jika AiS menemukan CT, ia harus memutuskan apakah ingin menjadi AiC, jika ya, $CM = (t, p)$ yang digunakannya. Jika $t > 0$, ia harus menunggu t langkah waktu sebelum membuat permintaan untuk koordinasi. Jika AiC menemukan CT baru, ia mengabaikannya.
3. Jika AiS menerima permintaan untuk koordinasi, ia memutuskan apa yang akan ditawarkan untuk berpartisipasi dalam CT. AiC kemudian mengevaluasi semua tawaran. Jika tawaran AiS diterima, ia mengadopsi CT sebagai tujuan barunya. AiC tidak merespons permintaan untuk koordinasi.
4. Setiap agen memutuskan langkah berikutnya sesuai dengan tujuannya saat ini dan semua agen bergerak secara bersamaan.

Dalam memilih skenario untuk mengevaluasi model ini, kami dihadapkan pada salah satu masalah penelitian empiris: apakah kami menggunakan domain dunia nyata yang konkret atau bekerja di lingkungan abstrak? Pilihan kami yaitu kategori lingkungan abstrak. Keputusan ini diambil karena tujuan utama adalah untuk fokus pada aspek-aspek penting dari pengambilan keputusan agen tentang koordinasi (Cohen, 2006) dan dirasa bahwa ini paling baik dicapai tanpa batasan tambahan dari aplikasi dunia nyata. Namun demikian, diyakini bahwa skenario ini memodelkan fitur kunci yang terkait dengan pengambilan keputusan koordinasi yang ada di banyak skenario dunia nyata dan bahwa ini menggabungkan derajat dinamisme dan ketidakpastian yang diperlukan untuk mengevaluasi model koordinasi secara menyeluruh(Hanks et al., 1994).

Abstraksi mekanisme koordinasi

Langkah pertama dalam menggambarkan mekanisme koordinasi adalah mewakili mereka dengan cara yang umum sehingga mereka dapat dengan mudah dibandingkan. Untuk tujuan ini, kami mengadopsi karakterisasi yang mencakup teknik yang dapat diterapkan (persyaratan), aturan yang diikuti agen untuk menyelesaikan interaksi mereka (algoritma koordinasi), dan, tingkat koordinasi apa yang mungkin setelah algoritma koordinasi diterapkan (tingkat pencapaian). Dalam hal ini, kami mempertimbangkan biaya waktu berjalan untuk menyiapkan mekanisme dan kemungkinan keberhasilannya (Publishers & Lesser, 1998). Selain itu, kami perlu menemukan cara sederhana untuk mengkuantifikasi nilai-nilai ini dan untuk

tujuan ilustratif di bagian ini kami memilih skala kualitatif sederhana tinggi, sedang, dan rendah.

Tabel 1. Template generik dari CM.

Komponen teknik koordinasi

Persyaratan merupakan kondisi awal yang perlu dipenuhi sebelum algoritma koordinasi dapat dijalankan. Ini mencakup hal-hal seperti apakah protokol memerlukan fase pengaturan (misalnya, dalam perencanaan multiagen, dekomposisi tujuan diperlukan sebelum subtujuan dapat ditugaskan kepada agen) atau apakah ia memerlukan informasi tertentu yang tersedia (misalnya, jumlah agen dalam sistem). Persyaratan ini mungkin ditetapkan pada waktu desain dan/atau selama eksekusi waktu berjalan. Contoh kasus yang pertama adalah ketika agen tahu (karena telah diprogram) bagaimana menghubungi agen lain dalam sistem. Apakah kemampuan mereka sesuai dan seterusnya. Contoh kasus terakhir adalah ketika agen memperoleh informasi yang sama, tetapi, sebagai hasil dari interaksi mereka dengan orang lain.

Algoritma koordinasi

Rencana tindakan terperinci yang harus diikuti untuk mencapai koordinasi setelah persyaratan dipenuhi.

Tingkat pencapaian

Derajat koordinasi yang mungkin dari mengikuti langkah-langkah yang ditentukan dalam algoritma koordinasi.

Atribut meta data

Pengaturan biaya yaitu nilai yang mengukur biaya waktu berjalan yang terkait dengan persyaratan yang disebutkan di atas.

Probabilitas keberhasilan

Kemungkinan pada lingkungan tertentu bahwa mengikuti langkah-langkah dalam algoritma koordinasi akan menghasilkan koordinasi yang sukses.

Dari deskripsi ini, Tabel 2 menunjukkan representasi dari mekanisme ini.

Tabel 2. Protokol Jaringan Kontrak CM.***Komponen teknik koordinasi***

Persyaratan. Untuk menerapkan protokol, agen perlu memiliki informasi tentang bagaimana menghubungi satu sama lain (identifikasi penerima tawaran yang mungkin) dan bagaimana memberi peringkat pada tawaran yang masuk dari kontraktor potensial (kriteria pemilihan). Informasi tentang kontraktor dapat diberikan pada waktu desain (dalam lingkungan statis) atau ditentukan pada waktu berjalan (dalam kasus yang lebih dinamis).

Algoritma koordinasi.

Protokol terdiri dari tiga fase: mengidentifikasi kontraktor potensial, membuat keputusan tentang kontraktor mana yang akan dipilih dan melaksanakan tugas yang disepakati.

Tingkat pencapaian.

Ada beberapa alasan mengapa, setelah dipilih, protokol mungkin gagal menghasilkan koordinasi yang sukses. Misalnya, manajer mungkin tidak menerima tawaran dari kontrak potensial (karena mereka terlalu sibuk dan tidak tersedia atau karena mereka tidak tertarik pada tugas yang ada) atau tawaran yang diterima mungkin tidak memenuhi persyaratan manajer, atau kontrak yang dipilih mungkin tidak menerima kontrak yang diberikan.

Atribut meta data

Biaya untuk pengaturan: Biaya pengaturan utama terkait dengan pemberian kontrak. Ini tergantung pada berapa banyak waktu yang diperlukan untuk menentukan sekumpulan kontraktor potensial untuk mengirim permintaan, jika ini sudah terintegrasi, biayanya rendah, jika perlu ditentukan pada waktu berjalan, akan lebih memakan waktu karena mungkin melibatkan interaksi dengan broker(Excelente-toledo & Jennings, n.d.) dan waktu yang harus ditunggu agen untuk mendapatkan respons sebelum dapat membuat pilihan.

Probabilitas keberhasilan

Karena banyak kemungkinan yang mungkin terjadi, mekanisme memiliki kemungkinan untuk berhasil dalam tugas koordinasi dalam kasus umum. Jika informasi lebih lanjut tersedia tentang spesifik lingkungan maka kualifikasi ini akan lebih berhasil.

Prosedur pengambilan keputusan agen

Untuk mempelajari dampak rata-rata dari mekanisme koordinasi, model horizon tak terbatas dari pengambilan keputusan diadopsi pada kinerja jangka panjang agen; model horizon terbatas dapat menyebabkan perilaku tidak menentu saat langkah waktu terakhir mendekat. Tujuan agen adalah untuk memaksimalkan imbalan mereka, khususnya imbalan rata-rata mereka per unit waktu. Setiap agen melacak imbalan rata-ratanya sendiri, yang disebut sebagai laju imbalan, dan menggunakan laju ini untuk memutuskan berapa banyak yang harus dikenakan untuk layanannya sendiri dan kadang-kadang untuk memperkirakan laju yang

diharapkan dari agen lain (ketika ia tidak dapat membangun gambaran tentang mereka). Secara spesifik, setiap agen menggunakan laju imbalannya untuk mengevaluasi dan membandingkan berbagai tindakan yang tersedia baginya; jika ia dapat mempertahankan atau meningkatkan laju ini, ia memilih untuk melakukannya.

Agen mungkin memiliki berbagai disposisi terkait dengan kerjasama dan karakterisasi sosialitas yang digunakan di sini ditangkap oleh faktor kesediaan agen untuk berkooperasi (WtC) (Hogg & Jennings, 2001). Faktor ini, ω , mewakili bobot yang diberikan agen saat memilih untuk bekerjasama, relatif terhadap mengumpulkan imbalan biasanya. Ketika unit imbalan, secara efektif utilitas agen, memiliki mata uang yang sama, agen netral ($\omega = 1$) hanya perlu menerima imbalan yang sama dari CT seperti yang ia terima dari ST. Dengan demikian, jika $\omega > 1$, ia dapat digambarkan sebagai serakah, meminta lebih banyak imbalan daripada yang biasanya ia harapkan untuk diterima dan jika $\omega < 1$, ia dapat digambarkan sebagai tidak mementingkan diri, meminta kurang dari yang biasanya ia harapkan untuk diterima. Prosedur keputusan yang dijelaskan dalam bagian ini biasanya akan mengasumsikan bahwa agen bersifat netral, tetapi akan menyertakan x untuk menunjukkan di mana faktor ini masuk ke dalam perhitungan. Dalam model ini, ada empat jenis keputusan yang harus dibuat agen: (i) arah untuk bergerak; (ii) CM mana yang akan diadopsi, jika ada; (iii) berapa banyak yang harus ditawar ketika permintaan untuk koordinasi diterima; dan (iv) bagaimana menentukan tawaran mana yang akan diterima, jika ada.

Memutuskan arah untuk bergerak

Agen memutuskan untuk bergerak menuju tujuannya dengan memilih arah, atas, bawah, kiri, atau kanan, secara probabilistik sesuai dengan rasio kotak atas/bawah terhadap kotak kiri/kanan yang jauh dari tujuannya. Secara formal, jika agen berada di $[x_1, y_1]$ dan tujuannya berada di $[x_2, y_2]$, probabilitas (pmove) bahwa ia akan bergerak ke arah tertentu diberikan oleh:

$$\text{pmove(up/down)} = \frac{|y_1 - y_2|}{|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|}$$

(up if $y_2 < y_1$, down otherwise)

$$\text{pmove(left/right)} = \frac{|x_1 - x_2|}{|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|}$$

(up if $x_2 < x_1$, down otherwise)

Memutuskan CM mana yang dipilih

Untuk memformalkan prosedur keputusan ini, pertimbangkan grid M N dengan ukuran imbalan S untuk ST, dan R untuk CT, sebuah mekanisme koordinasi, $CM = (t, p)$, yang memerlukan t langkah waktu untuk disiapkan dan memiliki probabilitas keberhasilan p . Dalam dunia grid yang diketahui ukuran ini, agen dapat menghitung jarak rata-rata yang diharapkan

(avedist) dari agen yang terletak secara acak dari kotak CT serta deviasi rata-rata yang mungkin (avedev) yang harus dilakukan agen tersebut untuk sampai ke sana.

Pertama, jarak rata-rata di setiap arah dari kotak acak dari titik diberikan oleh:

$$x_distance(x) = \frac{2x(x-1) + M(M+1-2x)}{2M}$$

$$y_distance(y) = \frac{2y(y-1) + N(N+1-2y)}{2N}$$

Oleh karena itu, jarak rata-rata dari agen yang diberikan dari $[x, y]$ adalah:

$$Ave_dist(x, y) = x_distance(x) + y_distance(y)$$

Jarak rata-rata, ave_dist, dari agen dari ST-nya adalah jarak rata-rata antara dua titik acak di grid. Ini diberikan dengan merata-ratakan ave_dist(x, y) di seluruh x dan y :

$$ave_dist = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N ave_dist(x, y)}{M \times N}$$

Akhirnya, deviasi rata-rata agen untuk membantu dalam CT di $[x, y]$ dan kemudian pergi ke ST-nya, dibandingkan dengan pergi langsung ke ST-nya, diberikan oleh:

$$Ave_dev(x, y) = 2 \times ave_dist(x, y) - ave_dist$$

Berdasarkan angka-angka ini, agen dapat menilai surplus rata-rata dari koordinasi di CT di (x, y) menggunakan CMj = (t_j, p_j) . Pertama, ia harus memperkirakan biayanya sendiri dalam hal berapa lama CM akan diatur dan berapa lama ia mengharapkan untuk menunggu agen lain tiba. Karena AiC biasanya mengharapkan untuk menerima r unit hadiah per langkah waktu ($r = \frac{S}{ave_dist}$), biaya CMj diberikan oleh:

$$Cost_j(x, y) = r \times (t_j + ave_dist(x, y))$$

Kedua, AiC harus memperkirakan jumlah rata-rata hadiah yang akan diperlukan oleh m agen lain berdasarkan kesediaan mereka untuk berkooperasi (ω). Untuk membedakan hadiah rata-rata agen sendiri (r) dari r_{AiCoop} digunakan untuk merujuk pada hadiah rata-rata dari semua agen lain di lingkungan. Ketika AiC tidak memiliki pengetahuan tentang r_{AiCoop} , ia menggunakan hadiah rata-ratanya sendiri sebagai pendekatan

$$ave_bid_j(x, y) = \frac{r_{AiCoop} \times \omega \times ave_dev(x, y)}{p_j} \quad (1)$$

Ketiga, AiC memperkirakan surplus yang diharapkan (ave payoff) dari CMj dengan mengadopsi CT dengan mempertimbangkan probabilitas keberhasilan tugas (diwakili dengan hadiah R yang terkait dengan CT):

$$Ave_payoff(x, y) = p_j \times R \quad (2)$$

Menggunakan estimasi ini, AiC dapat mengevaluasi surplus reward yang diharapkan dari mengadopsi CM j:

$$Ave_surplus_j(x, y) = ave_payoff(x, y) - (cost_j(x, y) + (m \times ave_bid_j(x, y))) \quad (3)$$

Ketika memutuskan mana dari CMs yang akan diadopsi, agen menghitung surplus reward yang diharapkan dari masing-masing dan memilih yang memaksimalkan nilai ini. Jika surplus yang terkait dengan semua CMs negatif, agen mengadopsi opsi CM nol (yang didefinisikan memiliki surplus nol).

Memutuskan apa yang harus ditawarkan untuk menjadi AiCoop

Ketika agen menerima permintaan untuk berpartisipasi dalam CT, mereka mengajukan tawaran berdasarkan jumlah reward yang mereka butuhkan untuk mengkompensasi mereka karena menyimpang dari tujuan mereka saat ini. Mereka juga mengajukan jarak mereka saat ini dari keadaan CT. Dengan demikian, reward yang dibutuhkan agen ditentukan oleh jumlah waktu yang dihabiskan untuk menyimpang ke kotak CT, rata-rata reward per langkah waktu, dan probabilitas keberhasilan CM yang diusulkan.

Untuk menghitung reward yang diperlukan agen dari terlibat dalam koordinasi di CT, ia mempertimbangkan kompensasi baik untuk penyimpangannya dan untuk kemungkinan bahwa CM mungkin gagal; ia juga mempertimbangkan kesediaannya untuk bekerja sama. Dengan demikian, didapatkan:

$$\text{bid}_{ij} = \frac{r_i \times \omega_i \times \text{deviation}_i}{p_j} \quad (4)$$

Agen mengajukan tawarannya untuk berkoordinasi dan jaraknya dari CT. Jika seorang agen dipilih untuk berkoordinasi, ia mengadopsi CT sebagai tujuan saat ini. ST-nya hanya diadopsi kembali setelah CT telah diselesaikan.

Memutuskan tawaran AiCoop mana yang akan diterima

Proses pemilihan tawaran AiC didasarkan pada perhitungan biaya dari setiap tawaran yang diterima. Namun, ketika lebih dari dua agen diperlukan untuk mencapai CT, perlu untuk menangani fakta bahwa AiCoop mungkin harus menunggu di sel CT sementara AiCoop yang tersisa tiba (karena agen harus melakukan perjalanan dengan jarak yang berbeda).

Ada banyak cara untuk menangani situasi ini (lihat diskusi di bawah). Namun, untuk menyederhanakan estimasi imbalan yang diharapkan yang dilakukan oleh berbagai agen, kami mengasumsikan AiC membayar imbalan tambahan untuk waktu yang berlalu. Dengan demikian, untuk memutuskan tawaran mana yang akan diterima, ide umumnya adalah bahwa AiC memilih m proposal dengan biaya terendah (dari total tawaran yang diterima B).

Ini dilakukan dengan mempertimbangkan imbalan yang diminta dalam tawaran dan biaya waktu tunggu (biaya tawaran) dan kemudian memperkirakan imbalan yang diharapkan mengingat biaya ini dan investasinya.

Secara formal, AiC menghitung biaya setiap subset b dari B dengan m elemen dalam bentuk (bid_{ij}, T_i). Dari b, AiC memilih agen yang akan memakan waktu paling lama untuk tiba (yaitu, $\max T_b = \max_{(bid_{ij}, T_i) \in b} [T_i]$), kemudian dapat menentukan waktu maksimum yang akan dihabiskan setiap agen di sel.

Perkirakan biaya setiap tawaran berdasarkan imbalan dan waktu tunggu yang harus dibayar AiC:

$$\text{cost_bid}_b = \sum_{(bid_{ij}, T_i) \in b} (bid_{ij} + (\max T_b - T_i) \times q) \quad (5)$$

Menggabungkan semua ini, AiC memperkirakan surplus yang diharapkan diperoleh dengan mempertimbangkan biaya tawaran yang dipilih dan investasinya sendiri untuk menunggu kedatangan AiCoop terakhir.

Tawaran yang dipilih termasuk dalam subset b dari B yang memaksimalkan surplus yang diberikan oleh:

$$\text{surplus}_j = p_j \times R - \text{cost_bid}_b - r \times (t_j + \max T_b) \quad (6)$$

Jika tidak ada tawaran yang diterima yang memberikan surplus positif. Meskipun CM yang dipilih memiliki surplus yang diharapkan, secara kebetulan mungkin tidak ada agen yang cukup dekat untuk memberikan tawaran yang wajar. Dalam situasi seperti itu, AiC meninggalkan CT dan kembali ke ST. Dalam situasi di mana hanya satu agen lagi yang dibutuhkan untuk mencapai CT (kasus yang paling sederhana), tawaran yang dipilih adalah yang memiliki biaya (biaya tawaran) yang memaksimalkan imbalan surplus yang diperkirakan oleh persamaan surplus. Namun kali ini, tidak masuk akal untuk menggunakan \max_T dan T_i digunakan sebagai gantinya.

$$\text{cost_bid}_b = bid_{ij}$$

Jika, bagaimanapun, lebih banyak agen (tepatnya m agen) diperlukan untuk mencapai CT dan AiCoops tidak perlu menunggu sisanya untuk mencapai tugas kooperatif, biaya tawaran b harus mencerminkan fakta bahwa tawaran tidak terpengaruh oleh waktu tunggu.

Dalam hal ini, biaya setiap subset b dari m elemen diperkirakan dengan:

$$\text{cost_bid}_b = \sum_{(bid_{ij}, T_i) \in b} bid_{ij}$$

Hasil

Model Proses Markov dibangun dengan :

1. State yaitu kondisi sekolah (rendah, sedang, tinggi) berdasarkan indicator keberlanjutan.
2. Action yaitu mekanisme koordinasi (terpusat, desentralisasi, kolaboratif, dan adaptif)
3. Transition Probability yaitu peluang perpindahan kondisi sekolah antar state
4. Reward yaitu nilai keberlanjutan yang diperoleh dari setiap mekanisme

Hasil pemilihan mekanisme koordinasi menunjukkan bahwa:

1. Mekanisme koordinasi adaptif memiliki nilai harapan reward tertinggi dibandingkan mekanisme lainnya.
2. Sekolah yang menerapkan koordinasi adaptif memiliki peluang keberhasilan lebih besar untuk berpindah dari kondisi sedang ke tinggi.

4. KESIMPULAN

Kerangka ini memungkinkan agen untuk membuat pilihan yang terinformasi tentang tindakan koordinasi mereka karena secara abstrak dapat menggambarkan mekanisme koordinasi dalam hal biaya dan manfaat yang diharapkan. Dengan demikian, dalam kerangka ini, keputusan ini jelas dipisahkan dari pelaksanaan mekanisme yang merupakan bagaimana tugas sebenarnya dicapai dan bagaimana tindakan berbagai agen sebenarnya dikoordinasikan. Berdasarkan analisis Proses Markov, pemilihan dinamis mekanisme koordinasi adaptif merupakan strategi paling efektif untuk mencapai sekolah berkelanjutan secara jangka panjang.

5. REFERENCES

- Bourne, R. A., Excelente-toledo, C. B., & Jennings, N. R. (2022). *Run-Time Selection of Coordination Mechanisms in Multi-Agent Systems*.
- Carvalho, G., Bernardino, J., Cabral, B., & Pereira, V. (2025). *A Survey of Holistic Approaches for Distributed Database Systems : From Conceptual Model to Deployment*. 13(July). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3587670>
- Cohen, P. (2006). *Empirical Methods for Artificial Intelligence*.
- Durfee, E. H., Lesser, V. R., & Arbor, A. (2018). *Partial Global Planning : A Coordination Framework for Distributed Hypothesis Formation I Introduction*. 0–39.
- Excelente-toledo, C. B., & Jennings, N. R. (2019). *Learning When and How to Coordinate*. 80, 1–20.
- Gnanamani, C., & Kumaravel, A. R. (2025). *Coordination and Collaboration in Multi-Agent Autonomous Systems : A Swarm Intelligence Approach*. 7(3), 238–257.
- Hanks, S., Pollack, M. E., & Cohen, P. R. (1994). *Benchmarks , Testbeds , Controlled Experimentation , and the Design of Agent Architectures*. 14(4), 17–42.
- He, T., Hwang, H., Kean, W., Agustiono, T., Chen, K., Phan, Q., & Yuong, S. (2024). *Enhancing multi-agent system coordination : Fixed-time and event-triggered control mechanism for robust distributed consensus*. 15(September).
- Hogg, L. M. J., & Jennings, N. R. (2001). *Agents*. 31(5), 381–393.
- Mallampati, S., Shelim, R., & Saad, W. (2025). *Dynamic Strategy Adaptation in Multi-Agent*. 1–20.
- Malone, T. W. (1987). *Modeling Coordination in Organizations and Markets*. September 2015.
- Publishers, A., & Lesser, V. R. (1998). *Reflections on the Nature of Multi-Agent Coordination and Its Implications for an Agent Architecture * by*. July, 1–22.
- Radeva, I., Popchev, I., & Doukovska, L. (2025). *Multi-Agent Coordination Strategies vs . Retrieval-Augmented Generation in LLMs : A Comparative Evaluation*. 1–35.
- Rother, D., Pajarinen, J., Peters, J., & Weisswange, T. H. (2025). *Open-ended coordination for multi-agent systems using modular open policies*.
- Shen, Y. (2018). *Multi-Agent Coordination across Diverse Applications: A Survey*. 1–23.
- Shoham, Y., & Tennenholtz, M. (1992). *The general framewsr*.
- Tarasova, E., Erofeeva, V., Granichin, O., & Chernikov, K. (2025). *Decentralized adaptive task allocation for dynamic multi-agent systems*. 1–18.
- Yang, B., Gao, L., Zhou, F., Yao, H., Fu, Y., Sun, Z., Tian, F., & Ren, H. (2025). *A Coordination Optimization Framework for Multi-Agent Reinforcement Learning Based on Reward Redistribution and Experience Reutilization*. 1–24.